

С. А. Павлов

Исследование параметров воздушных потоков в пристанционных вентиляционных сбойках метрополитена мелкого заложения

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук,
г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: pavlov_s_a@inbox.ru

Аннотация. В подземных сооружениях метрополитена необходимо обеспечивать высокие требования параметров микроклимата. Одной из наиболее трудно решаемых задач является высокая концентрация мелкодисперсной пыли в воздухе, которым дышат пассажиры и персонал. Установку пассивных фильтрующих устройств предлагается разместить в пристанционных сбойках, так как через них перемещается наибольшее количество тоннельного воздуха, вызванного поршневым действием поездов. В рамках проведенного исследования определены параметры воздушных потоков через пристанционную вентсбойку в зависимости от частоты движения поездов по линии. Проведены натурные замеры скорости воздуха в пристанционной вентсбойке на одном из участков мелкого заложения Новосибирского метрополитена. Анализ результатов позволил уточнить обобщенную сетевую математическую модель статического воздухораспределения, на которой проводились основные исследования. На основании полученных результатов определены аэродинамические параметры, которым должны удовлетворять пассивные фильтрующие устройства.

Ключевые слова: вентиляция, метрополитен, поршневой эффект, воздухораспределение, вентиляционная сбойка, вычислительное моделирование, расход воздуха, аэродинамическое сопротивление, фильтрующее оборудование

S. A. Pavlov

Investigation of air flow parameters in near the station ventilation breakthrough of a shallow subway

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: pavlov_s_a@inbox.ru

Abstract. In the underground structures of the subway, it is necessary to ensure high requirements for microclimate parameters. One of the most difficult problems to solve is the high concentration of fine dust in the air that passengers and personnel breathe. The installation of passive filtering devices is proposed to be placed in near the station ventilation breakthrough, since the greatest amount of tunnel air, caused by the piston action of trains, moves through them. As part of the study, the parameters of air flows in near the station ventilation breakthrough were determined depending on the frequency of train movement along the line. Field measurements of the air velocity in near the station ventilation breakthrough at one of the shallow sections of the Novosibirsk Metro were carried out. The analysis of the results made it possible to refine the generalized network mathematical model of static air distribution, on which the main studies were carried out. Based on the results obtained, the aerodynamic parameters that passive filtering devices must satisfy are determined.

Keywords: ventilation, subway, piston effect, air distribution, ventilation breakthrough, numerical simulation, air flow, aerodynamic drag, filtering equipment

Введение

Тоннельная вентиляция является одним из основных элементов системы жизнеобеспечения метрополитенов [1-3]. В помещениях метрополитена, как наиболее важном объекте городской инфраструктуры, необходимо обеспечивать нормативные параметры внутреннего микроклимата [4, 5]. Исследования показывают, что в тоннельном воздухе содержится большая концентрация мелкодисперсной пыли, которая превышает допустимые показатели в среднем в 1,3-3,4 раза [6, 7]. Значительно превышающая допустимые нормы концентрация пыли в воздухе, которым дышат пассажиры и персонал метрополитенов, является одной из наиболее трудно решаемых задач. Исходя из этого возникает необходимость в дополнительной фильтрации и обеспыливания тоннельного воздуха.

В рамках проведенного исследования определены аэродинамические параметры фильтрующих устройств по очистке воздуха, которые планируется размещать в пристанционных вентиляционных сбойках. Поскольку, через эти вентсбойки проходит значительная часть тоннельного воздуха, которая возрастает с увеличением количества поездов и их встреч на рассматриваемом перегоне [8, 9]. Для обоснования геометрических и конструктивных параметров фильтрующих устройств необходимо определить общее количество воздуха, перемещаемое через пристанционные вентсбойки в результате поршневого действия поездов и интенсивности их движения по линии.

Целью проводимых исследований является определение параметров воздушных потоков в пристанционных вентиляционных сбойках метрополитена мелкого заложения от поршневого действия поездов на сетевой модели воздухо-распределения для обоснования аэродинамических требований к фильтрационному оборудованию.

Методы и материалы

Существующие станции метрополитенов имеют различные архитектурно-строительные решения – это делает каждую из них уникальной, что затрудняет получение общих закономерностей исследования воздухораспределения в вентиляционной сети действующего метрополитена [10-14]. Для достижения целей была разработана обобщенная численная модель воздухораспределения в вентиляционной сети метрополитена мелкого заложения [15, 16], состоящая из повторяющихся одинаковых типовых элементов, таких как «станционные пешеходные пути», «станционная вентиляционная камера», «перегонная вентиляционная камера» и соединяющие их участки перегонных тоннелей (рис. 1). Величины аэродинамических сопротивлений этих элементов рассчитаны как усредненные значения для соответствующих участков вентиляционной сети станций и тоннелей Новосибирского метрополитена [1, 17].

Типовая станция (рис. 2) имеет два вестибюля (кассовые залы), соединенных с четырьмя наземными павильонами. В кассовом зале, на входе и выходе установлены по два ряда дверей из 4-х створок с заданным углом открытия 30° . На каждом выходе из наземных павильон установлен один ряд дверей из 5-х створок с заданным углом открытия 30° .

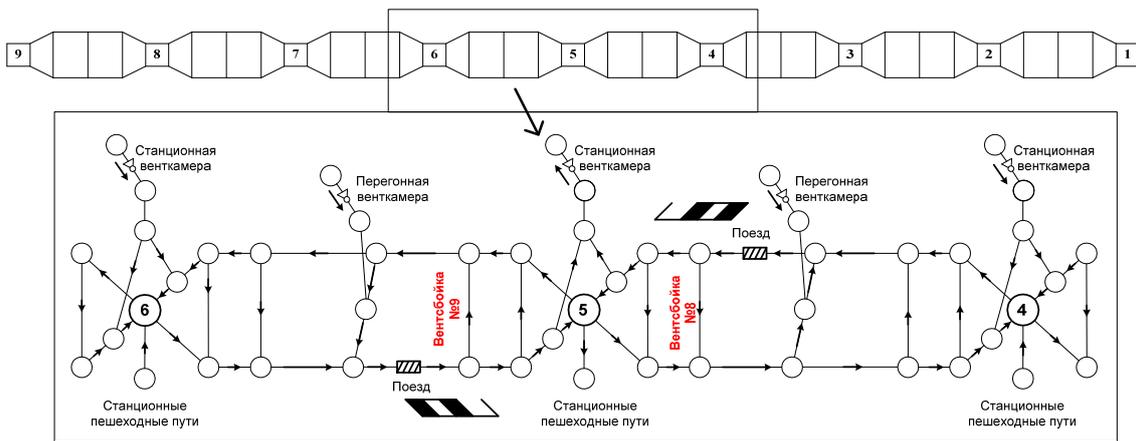


Рис.1 Упрощенная схема воздухораспределения в исследуемой численной модели

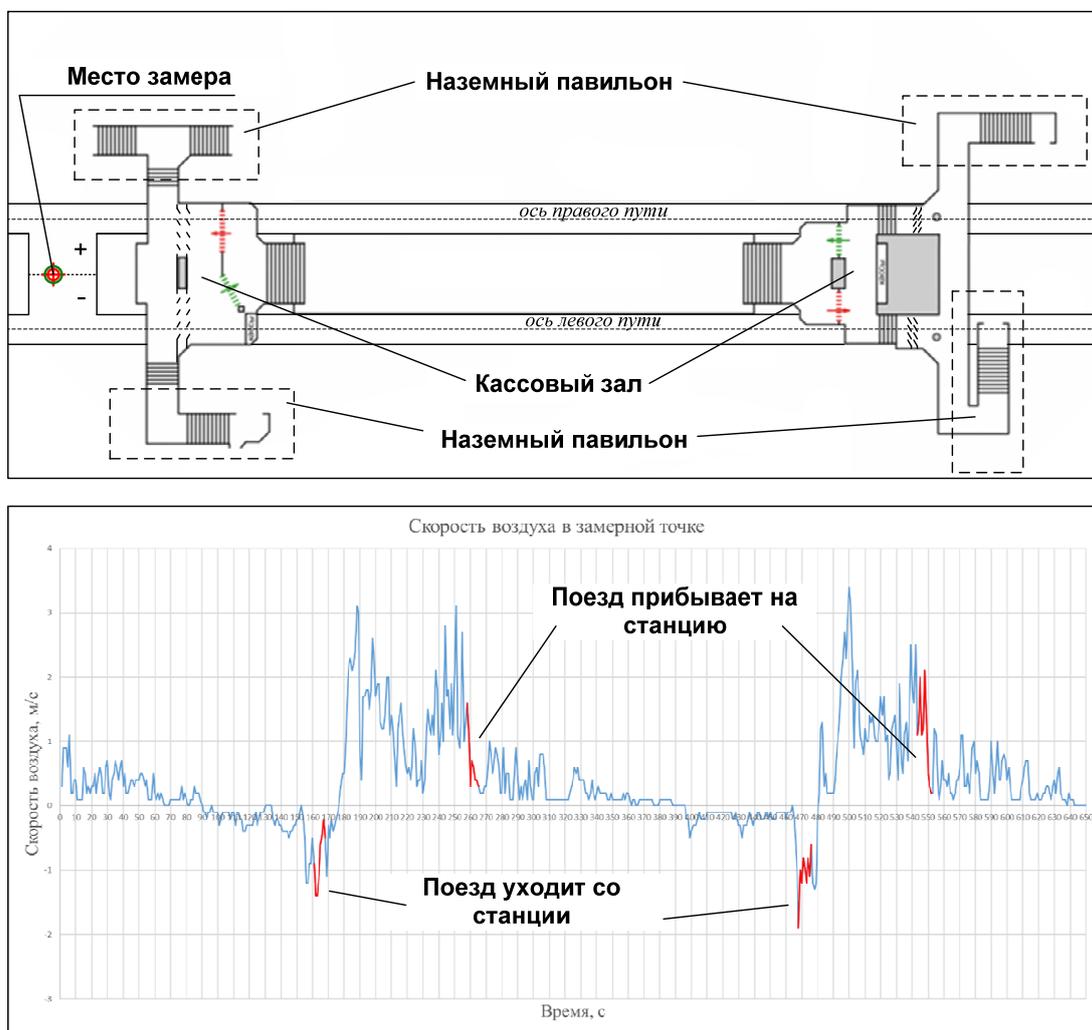


Рис.2 Схема станции Новосибирского метрополитена и график измерения скорости воздуха через ее пристанционную вентсбойку. Красным цветом на графике указаны участки, при которых поезд перемещался возле пристанционной вентсбойки (первый по времени поезд уходил со станции в сторону исследуемой вентсбойки)

Типовые тоннели стандартные однопутные с обделкой из железобетонных тубингов диаметром 5,1 м. Протяженность полу перегона (расстояние от края платформы до вентиляционной сбойки перегонной венткамеры) принималась 500 м. Пристанционные вентсбойки расположены с торцов платформенного зала и имеют вертикальное продольное сечение в среднем 100 м². Вся исследуемая линия метрополитена в обобщенной модели воздухораспределения, состоит из 9 станций и ограничена с двух сторон тупиками.

На воздухораспределение в вентиляционной сети метрополитена влияет скорость движения поезда, его тип и количество вагонов, площадь перекрытия поездом поперечного сечения тоннеля и условия обтекания подвижного состава потоком воздуха [18-31]. Поэтому при исследованиях на обобщенной модели воздухораспределения, были приняты следующие допущения: на перегоне 4-х вагонный поезд движется с постоянной скоростью 60 км/ч; 20 с поезд стоит без движения на станции; на разгон при уходе со станции от 0 до 60 км/ч поезд затрачивает 10 с, на торможение перед станцией (с 60 до 0 км/ч) – 20 с; при расчете воздухораспределения не учитывалось влияние естественной тяги.

В исследованиях отмечается, что движение воздуха через пристанционные сбойки происходит только от поршневого действия поездов. Поэтому моделирование нужно проводить для «весенне-осеннего режима» работы системы тоннельной вентиляции. В этом режиме главные вентиляционные установки выключены, их шиберные аппараты открыты, а вентиляция линии осуществляется, в основном, только за счет поршневого действия поездов [32-34].

Проведенные натурные исследования в пристанционной вентиляционной сбойке станции Новосибирского метрополитена показали, что направление движения воздуха через вентсбойку преимущественно постоянное и однонаправленное (рис.2). Поэтому, в обобщенной численной модели воздухораспределения, принято дополнительное допущение, что воздушный поток через пристанционную сбойку имеет всегда одно направление.

Объектом исследования в обобщенной модели воздухораспределения является расход воздуха на перегонах между станциями 4-5-6 (рис. 1). Эти станции расположены в середине линии, равноудалены от тупиков, количество воздуха, проходящего через них, одинаково и они классифицируются как промежуточные [35]. Поэтому, основные исследования воздухораспределения проводились в вентиляционных сбойках №8 и №9 (рис.1).

Результаты

Поезда начинают движение от станции №1 по левому пути с заданными интервалами, чтобы соответствовать рассматриваемым их частотам движения по линии: 4, 8, 12, 16 и 20 пар в час. После достижения станции №9, поезда меняют направление и идут в обратную сторону по правому пути.

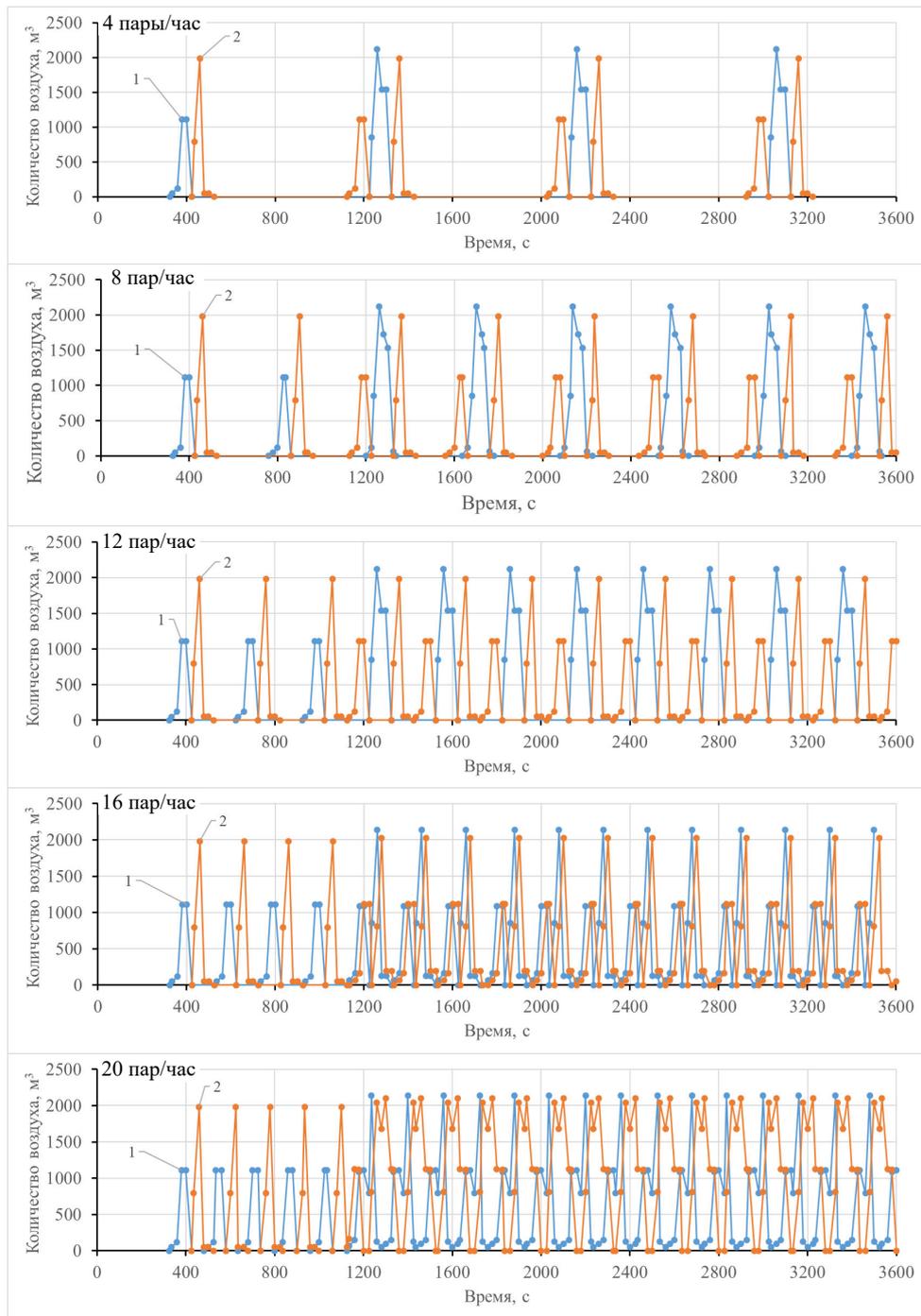


Рис. 3 Количество воздуха, перемещаемого через пристанционные вентсбойки №8 (1) и №9 (2), при частоте движения поездов по линии 4, 8, 12, 16 и 20 пар в час соответственно

На рисунке 3 показано количество воздуха, проходящее через пристанционные сбойки №8 и №9, инициированное поршневым действием поездов. Первый пик (рис. 3, синий график, поз.1) показывает количество воздуха, перемещаемого через пристанционную вентсбойку №8, вытесняемый из тоннеля головным вагоном поезда за счет избыточного давления перед ним. Как только поезд останавливается в платформенном зале станции 5, движение воздуха через пристанци-

онную вентсбойку прекращается. Второй пик (рис. 3, красный график, поз.2) показывает количество воздуха, перемещаемого через пристанционную вентсбойку №9, затягиваемый поездом из левого тоннеля за счет возникновения области разреженного давления за ним. После прохождения поездом перегонной венткамеры количество воздуха через пристанционную вентсбойку №9 резко снижается и полностью прекращается, когда поезд достигает станции 6.

В диапазоне 1125-1425с от начала движения первого поезда, на исследуемом участке, в окрестностях станции №5, происходит встреча поездов, движущихся в противоположных направлениях. Первый пик (рис. 3) показывает количество воздуха, перемещаемого через пристанционную вентсбойку №9, вытесняемого поездом (движущимся по левому пути от станции 6 к станции 5). Второй пик показывает количество воздуха, перемещаемого через вентсбойку №8, при совместном (встречном) движении двух поездов на полуперегоне (между станциями 4-5). Третий пик показывает количество воздуха, проходящего через пристанционную вентсбойку №9, затягиваемый хвостовым вагоном поезда из левого тоннеля (движущимся от станции 5 к станции 6 в правом тоннеле). Последующие пики являются результатом аналогичных встреч движущихся поездов в исследуемом районе линии на участке между станциями 4-5-6.

При частоте движения поездов по линии 20 пар/ч (рис. 6), через исследуемые вентсбойки №8 и №9 происходит непрерывное однонаправленное движение воздушных масс, изменяемых только по величине.

Общее количество воздуха, перемещаемое через пристанционные вентсбойки №8 и №9 станции 5 за час в зависимости от интенсивности движения поездов по линии приведено в таблице 1.

Таблица 1

Количество воздуха, проходящее через пристанционные вентсбойки №8 и №9 за час

Частота движения поездов по линии, пар/ч	Количество воздуха через пристанционную вентсбойку, м ³ /ч	
	Вентсбойка №8	Вентсбойка №9
4	20 521	18 689
8	43 268	37 378
12	55 521	53 190
16	77 464	82 311
20	97 733	149 852

Обсуждение

При моделировании воздухораспределения в вентиляционной сети от поршневого эффекта были рассмотрены все варианты сочетания взаимного расположения поездов на исследуемых перегонах. Выявлено, что максимальное количе-

ство воздуха в пристанционной сбойке №9 от поршневого эффекта наблюдается в случае, когда на одном полуперегоне в противоположных направлениях движутся одновременно два поезда, и составляет $86,2 \text{ м}^3/\text{с}$ (рис. 4). Эта величина принята за максимум. Необходимо оценить, как изменится расход воздуха в пристанционной вентсбойке при установке фильтрующего элемента, представляющего собой дополнительное аэродинамическое сопротивление.

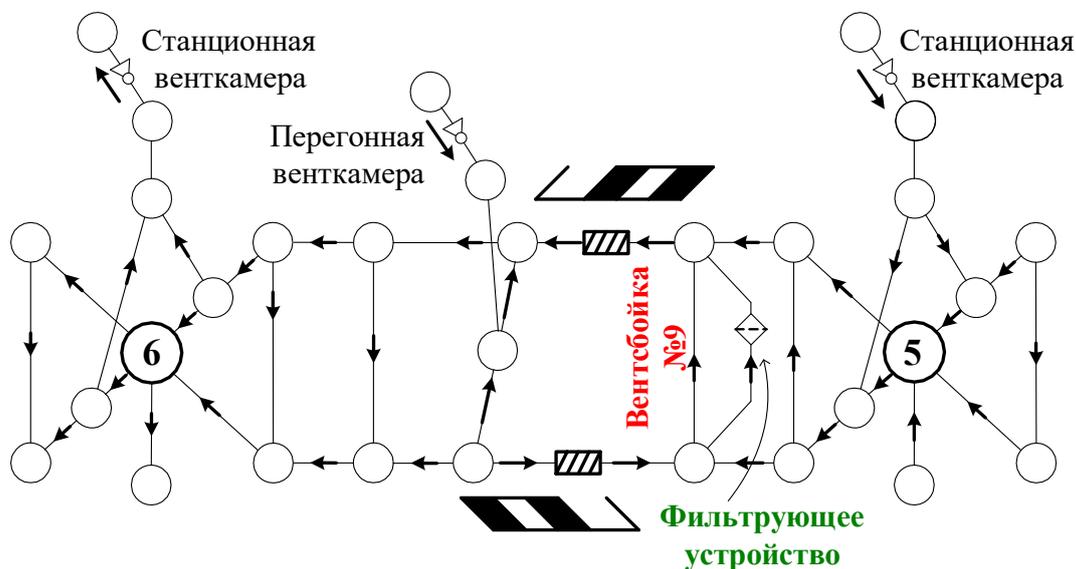


Рис.4 Схема расположения поездов на перегоне, вариант одновременного движения двух поездов на одном полуперегоне

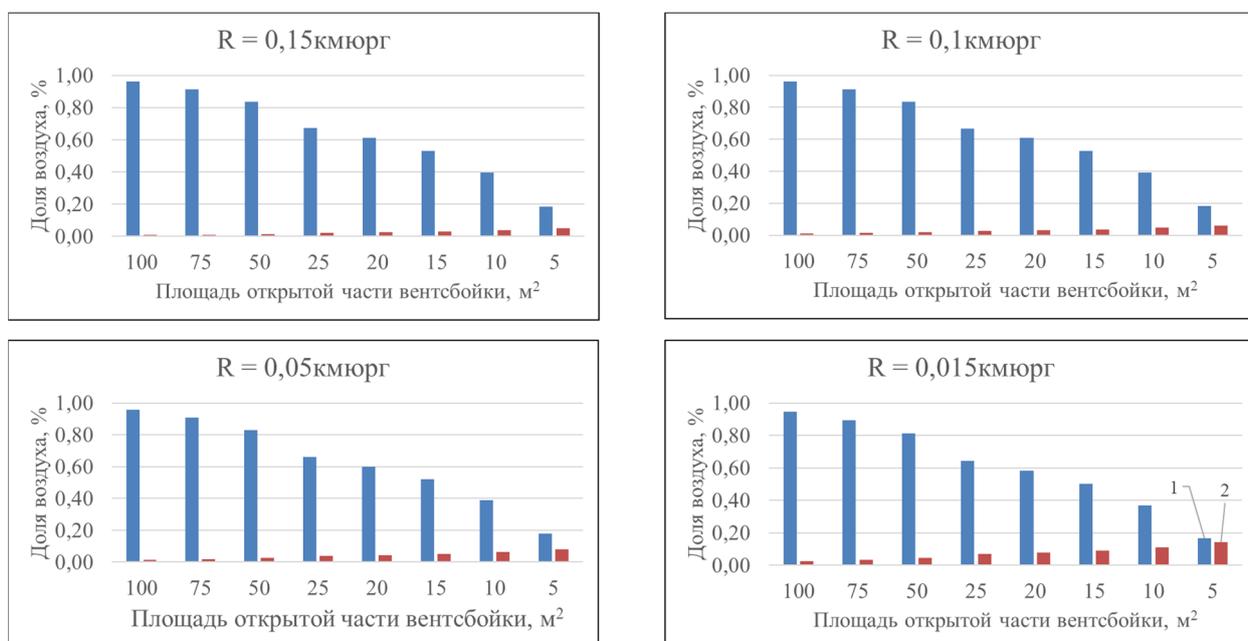


Рис.5 Процентное количество воздуха, проходящего через открытую часть вентсбойки (1) и через фильтрующее устройство (2) в зависимости от площади перекрытия сечения вентсбойки (рис. 4)

В расчетной сетевой модели фильтрующий элемент задавался веткой, параллельной вентсбойке (рис. 4). Сразу следует отметить, что дополнительное аэродинамическое сопротивление в пристанционной вентсбойке, изменяется расход воздуха как в ней, так и в платформенном зале станции [35, 36]. Величина перекрытия поперечного сечения вентсбойки фильтрующим элементом измерялась в (m^2) и оценивалась в процентах от проходного сечения вентсбойки. Например, проходное сечение вентсбойки составляет $100 m^2$ (или $20 \times 5 m$), что соответствует 100 % «открытому», а $5 m^2$ (или $1 \times 5 m$) – соответствует 5 % «открытого» сечения. Значения аэродинамического сопротивления фильтрующих элементов в этом случае необходимо принимать близкое к сопротивлению открытого сечения вентсбойки, иначе, воздух через них не пойдет. Поэтому, в исследовании рассматривались значения аэродинамического сопротивления фильтра с шагом $0,025 k\mu$, начиная от $0,15$ до $0,025 k\mu$. Отдельно рассматривался фильтрующий элемент с сопротивлением $0,015 k\mu$, как имеющий наиболее близкое к величине максимально закрытого проходного сечения вентсбойки (до 5 %).

Из полученных результатов видно (рис. 5), что наибольшее количество воздуха проходит через фильтр, при перекрытии им 95 % сечения вентсбойки. В абсолютных значениях получается, что через открытую часть сбойки средний расход воздуха составляет $11,47 m^3/c$ (или 17 % от общего), а через фильтр $9,63 m^3/c$ (или 14 % от общего). При этом $47,26 m^3/c$ поступает в платформенный зал (без перекрытия вентсбойки в платформенный зал поступало $1,88 m^3/c$, а через саму вентсбойку - $86,2 m^3/c$). Максимальный расчетный перепад давления на фильтре составил 14 Па.

Заключение

1. Определены зависимости изменения величины расхода воздуха, проходящего через пристанционные вентсбойки, от частоты движения поездов на линии (в пределах 20 пар/ч).

2. Выявлено, что перепад статического давления на фильтрующем устройстве площадью $95 m^2$ должно составлять не более 14 Па, при расходе воздуха через него $9,63 m^3/c$.

Благодарности

Данная статья написана по результатам исследований, выполненных в рамках проекта ФНИ (№ гос. регистрации 121052500147-6).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Цодиков В.Я. Вентиляция и теплоснабжение метрополитенов / В.Я. Цодиков – М.: Недра, 1975. – 237 с.

2. Красюк, А. М. Тоннельная вентиляция метрополитенов / А. М. Красюк ; А. М. Красюк ; отв. ред. Н. А. Попов ; Российская акад. наук, Институт горного дела. Сибирское отделение. – Новосибирск : Наука, 2006. – 163 с. – ISBN 5-02-032525-2. – EDN QNTEYX.

3. Красюк, А. М. Вентиляция метрополитенов / А. М. Красюк, И. В. Лугин ; Сибирское отделение РАН. – Новосибирск : Издательство Сибирского отделения РАН, 2018. – 316 с. – ISBN 978-5-7692-1629-9. – DOI 10.15372/VENTILATION2018KAM. – EDN YUNEVT.

4. Свод правил 120.13330.2012. Метрополитены. Актуализированная редакция СНиП 32-02-2003 : утв. Приказом Минрегион РФ 30.06.2012 : дата введ. 01.01.2013. – М. : [б.и.], 2013. – 260 с.
5. СП 2.5.2623-10 Санитарные правила эксплуатации метрополитенов. Изменения и дополнения N 1 к СП 2.5.1337-03 : утв. Пост. Главного государственного санитарного врача РФ от 30.04.2010 : дата введ. 08.06.2010. – М.: [б.и.], 2010. – 15 с.
6. Клинико-гигиенические параллели при исследовании условий труда и состояния здоровья работников тбилисского метрополитена / Н.Г. Хунашвили, Р.Г. Кверенчхиладзе, М. П. Цимакуридзе, Л. Ш. Бакрадзе, Майя П. Цимакуридзе // Аллергология и иммунология. – 2010. – том 11. – № 2. – С. 135-136.
7. Сазонова А. М. Исследование пылевого фактора производственной среды метрополитена // Гигиена и охрана труда транспортной отрасли. – 2016. – с. 79-85.
8. Исследование циркуляционных колец в сети тоннельной вентиляции метрополитена, возникающих от поршневого действия поездов // А.М. Красюк, И.В. Лугин, С.А. Павлов // ГИАБ. – 2011. – № S7. – с. 434–448.
9. Krasuyuk 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, P. 21–28.
10. Подойницын А.В. Система основной вентиляции Екатеринбургского метрополитена / А.В. Подойницын // Метро и тоннели – 2004. – № 4. – С. 40.
11. Монфред Е.В. Конференция по вопросам организации систем воздухообмена, контроля и управления микроклиматом, управления режимами вентиляции в экстремальных условиях в тоннелях и на станциях метрополитенов / Е.В. Монфред, В.Ф. Иванов // Метро – 1997. – № 6. – С. 43.
12. Коротков В.Н. Работа тоннельной вентиляции Петербургского метрополитена. Особенности состояния микроклимата / В.Н. Коротков // Метро и тоннели – 2004. – № 4. – С. 41.
13. Иванов С.А. Опыт ЭМС Московского метрополитена по обеспечению микроклимата на подземных объектах / С.А. Иванов // Метро и тоннели – 2004. – № 4. – С. 42-43.
14. Шерстнева Н.В. Контроль и организация воздухообмена в тоннеле и на станции Нижегородского метрополитена / Н.В. Шерстнева // Метро и тоннели – 2004. – № 4. – С. 38-39.
15. Кузнецов А.С. О применении потоковых алгоритмов для расчета воздухораспределения в вентиляционных сетях / А.С. Кузнецов, С.М. Лукин // ФТПРПИ. – 1989. – № 5. – С. 56-63.
16. Лукин С. М. Разработка математического и программного обеспечения расчета воздухораспределения для автоматизированного управления проветриванием шахт и рудников / Дис. канд. техн. наук: 05.13.07/ С.М. Лукин; ИГД СО РАН. – Новосибирск, 1989. – 94 с.
17. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик / Под ред. М. О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. // М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
18. С. 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.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. 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.

23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. X. Zhang, J. Ma, A. Li, W. Lv, W. Zhang, C. Yang, B. Deng, Train-induced unsteady airflow effect analysis on a subway station using field experiments and numerical modelling, *Energy Build.* 174 (2018) 228–238.
27. 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.
28. 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.
29. 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.
30. 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.
31. 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.
32. Красюк А.М. Взаимное влияние режимов вентиляции станций линии метрополитена / Красюк А.М., Лугин И.В., Чигишев А.Н. // *Метро и тоннели.* – 2002. – № 2. – С. 36-38.
33. 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.* – 2009. – № S13. – С. 48-57. – EDN LAETVJ.
34. Павлов С.А. Повышение эффективности использования поршневого действия поездов для тоннельной вентиляции метрополитена / Дис. канд. техн. наук: 25.00.20 / С.А. Павлов; ИГД СО РАН. – Новосибирск, 2011. – 148 с.
35. Красюк, А. М. Об эффекте возникновения циркуляционных колец и их влиянии на воздухораспределение в метрополитене мелкого заложения / А. М. Красюк, И. В. Лугин, С. А. Павлов // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых.* – 2010. – № 4. – С. 75-82. – EDN MWBZDL.
36. Krasyyuk, A. M. Experimental research into air distribution in a terminal subway station / A. M. Krasyyuk, I. V. Lugin, S. A. Pavlov // *Tunnelling and Underground Space Technology.* – 2019. – Vol. 85. – P. 21-28. – DOI 10.1016/j.tust.2018.11.049. – EDN GIDZKD.

© С. А. Павлов, 2023