



**ВЛИЯНИЕ УСТАНОВКИ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ
В ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СБОЙКЕ НА ВЕЛИЧИНУ ВОЗДУХООБМЕНА
СТАНЦИИ МЕТРОПОЛИТЕНА**

Т. С. Ощепков, Л. А. Кияница

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: timofeyoshchepkov@gmail.com, lavrentij.kijanitza@yandex.ru,
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

В результате вычислительного эксперимента определены параметры нестационарного воздухораспределения от поршневого эффекта поездов и структура воздушного потока в местах установки фильтров в зависимости от мест их расположения в вентсбойке. Получены зависимости изменения расхода воздуха на станции от коэффициента перекрытия сечения вентиляционной сбойки.

Метрополитен, кольцевые модели, поршневой эффект, фильтрационное оборудование, воздухо-распределение

**INFLUENCE OF FILTRATION EQUIPMENT INSTALLATION
IN VENTILATION CONNECTION ON AIR EXCHANGE IN SUBWAY STATION**

T. S. Oshchepkov and L. A. Kiyanita

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: timofeyoshchepkov@gmail.com, lavrentij.kijanitza@yandex.ru,
Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

As a result of a computational experiment, the parameters of transient air distribution from the piston effect of trains and the structure of air stream at the places of filter installation are determined depending on their locations in a ventilation connection. The dependences of change in air consumption at the station on the coefficient of closing section of ventilation connection are obtained.

Subway, circular models, piston effect, filtration equipment, air distribution

Одной из основных задач при эксплуатации метрополитена является поддержание параметров внутреннего микроклимата в рамках действующих нормативных и санитарных требований [1, 2]. Так, содержание взвешенной пыли в воздухе не должно превышать значения предельно допустимой концентрации (ПДК). Однако ряд проведенных исследований [3–6] показал, что воздух метрополитена содержит твердые частицы во взвешенном состоянии в концентрации, превышающей ПДК. Мелкодисперсная пыль в высокой концентрации приводит к возникновению болезней органов дыхания [7], а также является благоприятной средой для распространения патогенных бактерий [8]. Для снижения концентрации взвешенной пыли в метрополитене следует дополнительно фильтровать и обеспыливать циркулирующий в нем воздух. Устройства для очистки воздуха предлагается устанавливать в пристанционных вентиляционных сбойках, так как значительная часть тоннельного воздуха проходит именно через них [9–11], образуя циркуляционное кольцо, причем расход воздуха через вентиляционную сбойку увеличивается с повышением количества встреч поездов. Установка фильтрационного оборудования в вент-

сбояке необратимо вызовет увеличение аэродинамического сопротивления этого участка, что, в свою очередь, может привести к уменьшению расхода воздуха через вентсбойку и увеличению расхода воздуха на станции.

Цель работы — определение закономерностей влияния фильтрационного оборудования на воздухообмен станции метрополитена и пристанционной вентсбойки, в которой установлено фильтрационное оборудование, в зависимости от коэффициента перекрытия сечения вентсбойки.

Расчетная модель и методы исследования. К расчету принят участок метрополитена, включающий в себя три типовые станции островного типа и три перегона с однопутными тоннелями. На одной из станций, в пристанционных вентиляционных сбойках, установлены устройства для очистки воздуха (фильтры). На расчетном участке расположены два поезда каждый в своем тоннеле, которые с максимальной скоростью 20 м/с движутся от одной станции к другой во встречном направлении. Время стоянки на станции составляет 20 с.

Для получения наиболее достоверных результатов при исследовании воздухораспределения в подземных сооружениях метрополитена использована кольцевая модель линии метрополитена. Применение кольцевой модели для моделирования аэродинамических процессов в сооружениях метрополитена обосновано в работе [11]. Геометрические характеристики расчетной модели приняты на основании чертежей проектируемого Омского метрополитена и представлены на рис. 1.

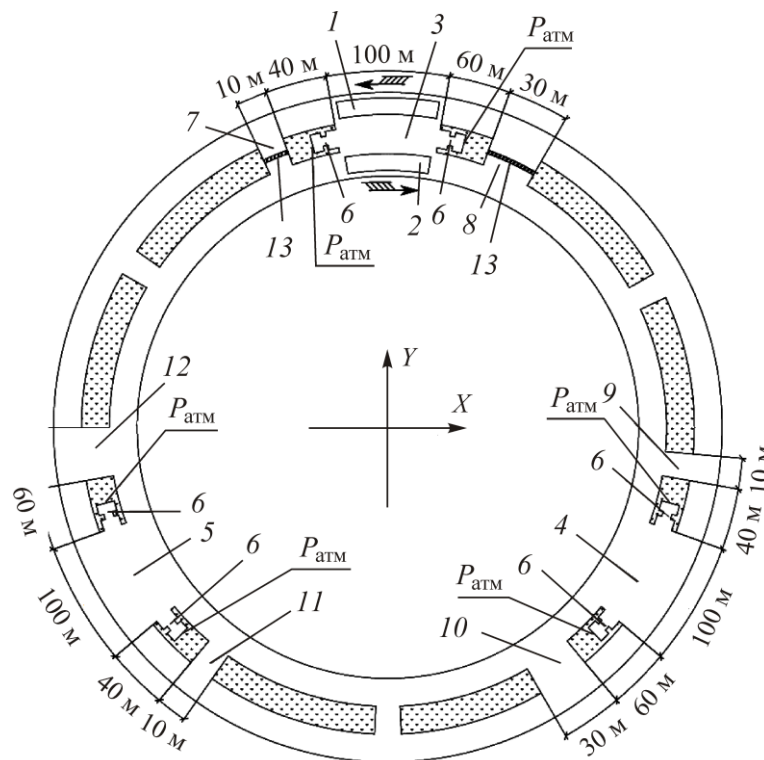


Рис. 1. Геометрические характеристики расчетной модели метрополитена: 1 — поезд № 1, 2 — поезд № 2; 3 — станция № 1; 4 — станция № 2; 5 — станция № 3; 6 — выход к вестибюлю; 7 — вентсбойка № 1.1; 8 — вентсбойка № 1.2; 9 — вентсбойка № 2.1; 10 — вентсбойка № 2.2; 11 — вентсбойка № 3.1; 12 — вентсбойка № 3.2; 13 — место установки фильтрационного оборудования; $P_{\text{атм}}$ — атмосферное давление

Для определения поля скоростей воздуха в расчетной модели метрополитена применен программный комплекс ANSYS Fluent, основанный на методе конечных объемов [12], при котором расчетная модель разбивается на множество элементов — конечно-элементную сетку. Для каждого элемента описывается система законов сохранения массы, импульса и энергии

в интегральной форме, которая преобразуется в систему алгебраических уравнений относительно искомых величин в центрах расчетных ячеек. Конечным результатом задачи является определение поля скоростей воздуха путем численного решения системы уравнений, состоящей из уравнений Навье – Стокса, уравнения Пуассона для давлений и $k-\varepsilon$ Realizable модели турбулентности.

Задача решалась в нестационарной постановке для пяти вариантов перекрытия сечения вентиляционной сбойки фильтрационным оборудованием (фильтром), %: 1 — перекрытие сечения составляет 0; 2 — 50; 3 — 75; 4 — 100, в варианте 5 — 50 % фильтром и 50 % воздухопроницаемой перегородкой. Коэффициент перекрытия сечения определяется по формуле

$$k = \frac{F_{\phi}}{F_c} 100 \%,$$

где F_{ϕ} — площадь фильтра, m^2 ; F_c — площадь вентсбойки, m^2 .

Для уменьшения продолжительности времени вычислений данная задача решалась в плоской постановке. Шаг по времени выбирался исходя из равенства числа Куранта единице

$$Ku = \frac{\Delta\tau V_{\Pi}}{s} = 1,$$

где $\Delta\tau$ — шаг по времени, с; V_{Π} — скорость поезда, м/с; s — размер ячейки по направлению движения поезда, м.

Шаг по времени равен 0.05 с. Общее время движения поезда составило 887 с (шесть циклов прихода и ухода поезда на станцию и со станции). За цикл принят момент времени от начала торможения поезда перед рассматриваемой вентсбойкой до начала следующего торможения поезда перед этой вентсбойкой. Общее время цикла составило 296 с. Задание аэродинамического сопротивления фильтра осуществлялось с помощью стандартной функции “пористого тела” программного комплекса ANSYS Fluent. Коэффициент местного сопротивления фильтра ξ принят 18, что наиболее характерно для фильтров, применяемых в системах вентиляции и подходящих для использования в условиях метрополитена. При этом падение давления на участке с этим фильтрационным оборудованием в среднем составит 100 Па при скорости воздушного потока 3 м/с.

В процессе решения получены закономерности изменения скорости тоннельного воздуха, определены векторы и поле скоростей в пристанционной вентиляционной сбойке. На рис. 2 представлены векторы и поле скоростей воздуха в вентиляционной сбойке № 1.2 в момент времени, когда движущийся поезд находится на расстоянии 400 м от нее: на рис. 2а показан вариант расчета, когда сечение вентсбойки полностью открыто, на рис. 2б — сечение сбойки перекрыто фильтром наполовину, на рис. 2в — три четверти сечения вентсбойки перекрыто фильтром, на рис. 2г — сечение вент сбойки полностью перекрыто фильтром.

Расстояние в 400 м от вентсбойки № 1.2 взято из условия, что движущийся поезд преодолел перегонную вентсбойку, расположенную между двумя станциями (№ 1 и № 2) на перегоне и выталкивает воздух за счет поршневого эффекта только через вентсбойку № 1.2 в соседний тоннель и на станцию № 1. Видно, что использование фильтрационного оборудования в пристанционной вентиляционной сбойке не приводит к прекращению циркуляции воздуха через нее.

На рис. 3 изображены векторы и поля скоростей воздуха в вентиляционной сбойке № 1.2 в момент времени, когда движущийся поезд находится на расстоянии 400 м от нее: на рис. 3а — вариант расчета, когда сечение сбойки перекрыто фильтром наполовину; на рис. 3б — когда сечение сбойки, на одну половину перекрыто фильтром, на другую — воздухопроницаемой перегородкой.

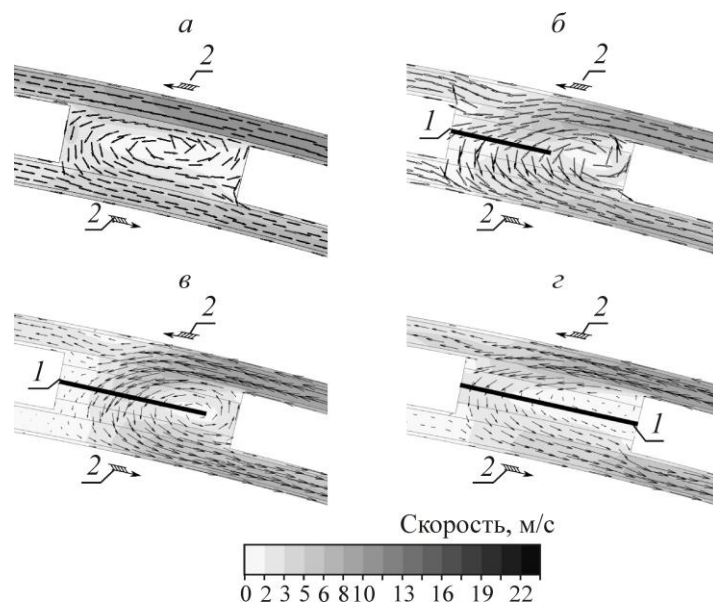


Рис. 2. Векторы и поля скоростей в вентиляционной сбойке № 1.2: 1 — место размещения фильтрационного оборудования; 2 — направление движения поезда (стрелками указано направление движения потока воздуха)

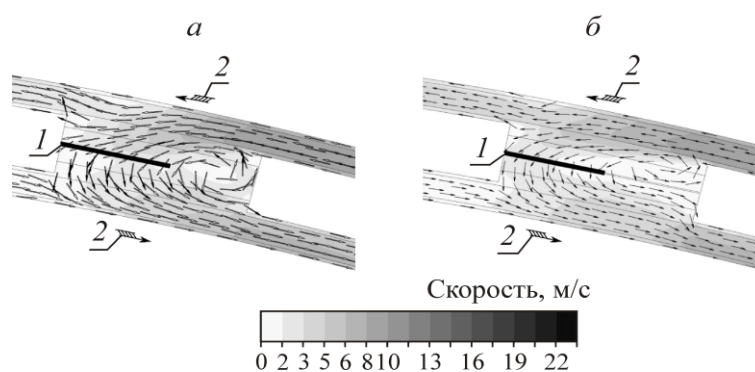


Рис. 3. Векторы и поля скоростей в вентиляционной сбойке № 1.2: 1 — место размещения фильтрационного оборудования; 2 — направление движения поезда

На основании полученных данных определено количество воздуха Q , м³/цикл, прошедшее через станцию и пристанционную вентиляционную сбойку за цикл. Результаты представлены на рис. 4. Видно, что изменение расхода воздуха на станции метрополитена при установке фильтрационного оборудования в вентиляционной сбойке незначительно и не превышает 5 %.

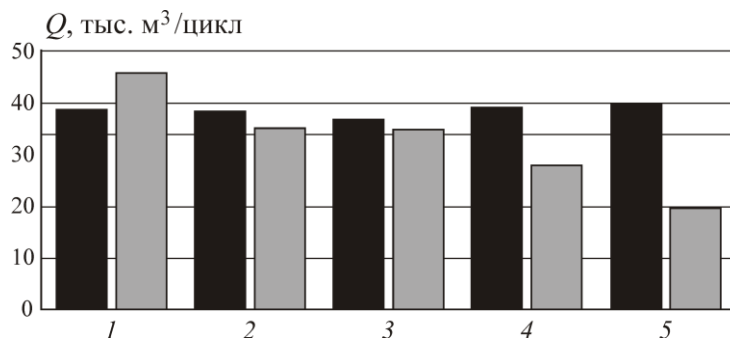


Рис. 4. Количество воздуха, прошедшее через станцию и вентиляционную сбойку в зависимости от коэффициента перекрытия сечения вентсбойки фильтром: черный столбец — количество воздуха, прошедшее через станцию за цикл; серый — через вентсбойку. Перекрытие сечения k составляет, %: 1 — 0; 2 — 50; 3 — 75; 4 — 100; 5 — 50 % фильтром и 50 % воздухонепроницаемой перегородкой

Дополнительно рассмотрен вариант перекрытия сечения вентсбойки воздухонепроницаемой перегородкой (рис. 3б) и проведено его сравнение с вариантом, изображенным на рис. 2б и рис. 3а. Так, для варианта, показанного на рис. 3а, количество воздуха, прошедшее через сечение вентсбойки за цикл, составило 35.5 тыс. м³, а для варианта на рис. 3б — 19.8 тыс. м³. Видно, что применение воздухонепроницаемой перегородки для перекрытия открытой части сечения вентсбойки приводит к изменению структуры проходящего потока воздуха и увеличению его количества через сечение фильтра.

ВЫВОДЫ

В результате исследований влияния установки фильтрационного оборудования на воздухообмен станции метрополитена определена структура поля скорости воздушного потока в пристанционной вентиляционной сбойке в зависимости от коэффициента перекрытия сечения, а также выявлено, что изменение воздухообмена станции метрополитена при размещении фильтрационного оборудования в вентиляционной сбойке носит несущественный характер и не превышает 5 %.

Показано, что при перекрытии сечения вентсбойки от 0 до 100 % фильтрационным оборудованием с коэффициентом местного сопротивления, равным 18, наблюдается снижение расхода воздуха от 46 тыс. м³/цикл при отсутствии фильтра ($k = 0\%$) до 28.4 тыс. м³/цикл при $k = 100\%$ перекрытия. Наличие воздухонепроницаемой перегородки, используемой для перекрытия открытой части сечения вентсбойки, приводит к увеличению расхода воздуха через сечение фильтра и к уменьшению расхода воздуха через вентсбойку в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- 1. Set of rules** 120.13330.2012. Subways, Updated edition of SNiP 32-02-2003, Ministry of Regional Development, Moscow, 2013, 260 pp. (in Russian) [СП 120.13330.2012. Метрополитены. Актуализированная редакция СНиП 32-02-2003. – Утв. Приказом Минрегион РФ 30.06.2012: дата введ. 01.01.2013. — М., 2013. — 260 с.]
- 2. Sanitary regulations** 2.5.3650-20. Sanitary and Epidemiological Requirements for Certain Modes of Transport and Transport Infrastructure Facilities, Approved by the Chief State Sanitary Physician of the Russian Federation, Moscow, 2020, 101 pp. (in Russian) [СП 2.5.3650-20 Санитарно-эпидемиологические требования к отдельным видам транспорта и объектам транспортной инфраструктуры. – Утв. Пост. главного гос. санитарного врача РФ от 16.10.2020: дата введ. 01.01.2021. — М., 2020. — 101 с.]
- 3. Khumashvili N. G., Kverenchkhiladze R. G., Tsimakuridze M. P., Bakradze L. Sh., and Tsimakurid M. P.** Clinical picture and hygiene of working conditions and health in the Tbilisi Metro, *Alergologiya and Immunologiya*, 2010, vol. 11, no. 2, pp. 135–136. (in Russian) [Хунашвили Н. Г., Кверенчхиладзе Р. Г., Цимакуридзе М. П., Бакрадзе Л. Ш., Цимакурид М. П. Клинико-гигиенические параллели при исследовании условий труда и состояния здоровья работников тбилисского метрополитена // Аллергология и иммунология. — 2010. — Т. 11. — № 2. — С. 135–136.]
- 4. Sazonova A. M.** Study of the dust factor of the production environment of the metro, *Hygiene and labor protection of the transport industry*, 2016, pp. 79–85. (in Russian) [Сазонова А. М. Исследование пылевого фактора производственной среды метрополитена // Гигиена и охрана труда транспортной отрасли. — 2016. — С. 79–85.]
- 5. Particulate matter (PM) concentrations in underground and ground-level rail systems of the Los Angeles Metro**, *Atmospheric Environment*, 2011, vol. 45, pp. 1506–1516.
- 6. Senlin Lu, Dingyu Liu [and others].** Physico-chemical characterization of PM2.5 in the microenvironment of Shanghai subway, *Atmospheric Research*, 2015, vol. 153, pp. 543–552.

7. **Sachkova O. S., Matveeva T. V., Zubrev N. I., Ustinova M. V., and Kashintseva V. L.** Development of measures to improve the working conditions of tunnel workers, XXI century: the results of the past and the problems of the present, 2018, vol. 7, no. 3 (43), pp. 145–149. (in Russian) [**Сачкова О. С., Матвеева Т. В., Зубрев Н. И., Устинова М. В., Кашинцева В. Л.** Разработка мероприятий по оздоровлению условий труда тоннельных рабочих // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего. — 2018. — Т. 7. — № 3 (43). — С. 145–149.]
8. **Kopytenkova O. I., Shilova E. A., and Sazonova A. M.** An integrated approach to the assessment of bi-odestructive factors in the development of underground space, Internet-magazine “Science”, vol. 7, no. 1, 2015, pp. 1–16. (in Russian) [**Копытенкова О. И., Шилова Е. А., Сазонова А. М.** Комплексный подход к оценке биодеструктивных факторов при освоении подземного пространства // Интернет-журнал “Науковедение”. — 2015— Т. 7. — № 1. — С. 1–16.]
9. **Krasyuk A. M., Lugin I. V., and Pavlov S. A.** Circulatory air rings and their influence on air distribution in shallow subways, Journal of Mining Science, 2010, vol. 46, no. 4, pp. 431–437. [**Красюк А. М., Лугин И. В., Павлов С. А.** Циркуляционные воздушные кольца и их влияние на распределение воздуха в подземных переходах // ФТПРПИ. — 2010. — № 4. — С. 431–437.]
10. **Krasyuk A. M., Lugin I. V., and Pavlov S. A.** Experimental research into air distribution in a terminal subway station, Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, vol. 85, pp. 21–28.
11. **Oshchepkov T. S., Kiyanitsa L. A., and Lugin I. V.** To the problem of determining air velocity field in tunnel structures of a subway line using circular models as a method of topological decomposition, Interexpo Geo-Siberia, 2020, vol. 2., pp. 129–137. (in Russian) [**Ощепков Т. С., Кияница Л. А., Лугин И. В.** К вопросу определения поля скоростей воздуха в тоннельных сооружениях линии метрополитена с использованием кольцевых моделей как способа топологической декомпозиции // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2020. — Т. 2. — С. 129–137.]
12. **Fedorova N. N., Valger S. A., Danilov M. N., and Zakharova Yu. V.** Fundamentals of work in ANSYS 17, DMK Press, Moscow, 2017, 210 pp. (in Russian) [**Федорова Н. Н., Вальгер С. А., Данилов М. Н., Захарова Ю. В.** Основы работы в ANSYS 17. — М.: ДМК Пресс, 2017. — 210 с.]