



**ОБОСНОВАНИЕ КОМПОНОВКИ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ В
ПРИСТАНЦИОННОЙ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СБОЙКЕ МЕТРОПОЛИТЕНА**

Л. А. Кияница, И. В. Лугин, А. М. Красюк

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: lavrentij.kijanitz@yandex.ru, ivlugin@misd.ru, krasuk@cn.ru,
ул. Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

С помощью вычислительных методов определен диапазон углов относительно оси поперечного сечения вентиляционной сбойки вектора скорости входящего в нее воздушного потока от поршневого действия поездов. На основании полученных данных приведены рекомендации по наиболее рациональным габаритам, пространственному расположению и углу установки панелей противопылевых фильтров в вентиляционной сбойке.

Метрополитен, вентиляция, очистка воздуха от пыли, кольцевые модели, поршневой эффект, воздухораспределение, пристанционная вентиляционная сбойка

**JUSTIFICATION OF FILTERING EQUIPMENT ARRANGEMENT
IN STATION VENTILATION CONNECTION OF A SUBWAY**

L. A. Kiyantsa, I. V. Lugin, and A. M. Krasuk

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: lavrentij.kijanitz@yandex.ru, ivlugin@misd.ru, krasuk@cn.ru,
Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

In this paper, the range of angles of the velocity vector of incoming air flow relative to the cross-sectional axis of ventilation connection between tunnels is determined by computational methods. Based on the data obtained, recommendations are given for the most rational dimensions, spatial location and installation angle of dust filter panels in the ventilation connection between tunnels.

Subway, ventilation, dust filtration, ring patterns, piston effect, air distribution, station ventilation connection

Поддержание требуемой концентрации пыли в метрополитенах в пределах допустимых значений — одна из основных задач системы тоннельной вентиляции, что обуславливает интерес к данной проблеме как отечественных, так и зарубежных исследователей [1–12]. В отечественных метрополитенах концентрация мелкодисперсной пыли превышает допустимые нормы в несколько раз, что в долгосрочной перспективе может спровоцировать хронические заболевания дыхательной системы пассажиров и обслуживающего персонала. Для организации пылеулавливания в тоннельных сооружениях метрополитена предлагается устанавливать фильтрационное оборудование в вентиляционных сбойках. Но для обеспечения наибольшей эффективности пылеулавливания оно должно быть расположено под углом 90° к вектору средней скорости потока.

Целью работы является определение диапазона углов φ вектора средней скорости v_{ave} воздушного потока, входящего в вентиляционную сбойку, относительно оси ее поперечного сечения для обоснования угла установки в вентсбойке фильтрационного оборудования.

Расчетная модель и методы исследования. Расчетная модель участка метрополитена состоит из трех станционных комплексов и трех перегонных участков однопутных тоннелей. Для учета аэродинамического сопротивления тоннелей и станций протяженной линии метро, не вошедших в исследуемый участок, использована кольцевая модель [3], как метод топологической декомпозиции линии. Это позволяет уменьшить размер модели и при этом учесть аэродинамическое сопротивление участков, не вошедших в модель. Выбор именно трех станционных комплексов и трех участков перегонных тоннелей обоснован тем, что согласно [13, 14] поезда оказывают влияние на расход воздуха через станцию до тех пор, пока не удалятся от рассматриваемой станции на два перегона. Геометрические характеристики расчетной модели и граничные условия приведены на рис. 1.

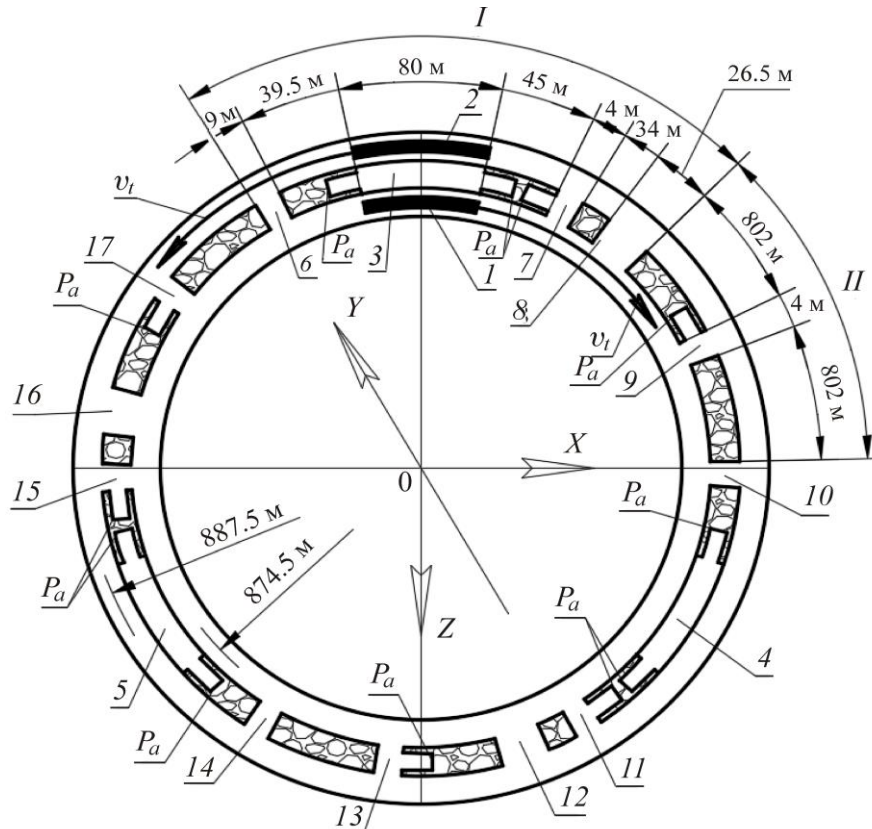


Рис. 1. Геометрические характеристики и граничные условия расчетной модели аэродинамических процессов: 1, 2 — поезда; 3, 4, 5 — пассажирские платформы; 6, 8, 10, 12, 14, 16 — пристанционные вентиляционные сбойки; 9, 13, 17 — сбойки к перегонным вентиляторам; 7, 11, 15 — сбойки к станционным вентиляторам; P_a — атмосферное давление; v_t — скорость поезда; I — границы станционного комплекса; II — перегонный тоннель

Решение базируется на численном решении системы уравнений (1)–(3) с применением $k-\varepsilon$ RNG модели турбулентности (уравнения (4)–(6)) методом контрольных объемов:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \nabla(\rho \bar{u}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u})}{\partial \tau} + \nabla \rho \bar{u} \otimes \bar{u} = -\nabla p + \nabla \Lambda, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho K)}{\partial \tau} + \nabla(\rho \bar{u} K) = -\bar{u} \nabla p + \bar{u}(\nabla \cdot \Lambda), \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial k}{\partial \tau} + \nabla(\bar{u} k \rho) = \nabla \left(\left[\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right] \nabla k \right) + P_k - \rho \varepsilon + P_{kb}, \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} + \nabla(\bar{u} \varepsilon \rho) = \nabla \left(\left[\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon RNG}} \right] \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1 RNG} P_k - C_{\varepsilon 2 RNG} \varepsilon \rho + C_{\varepsilon 1 RNG} P_{\varepsilon b}), \quad (5)$$

$$\mu_t = C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (6)$$

Здесь $\Lambda = \mu(\nabla \bar{u} + (\nabla \bar{u})^T - (2/3)\delta \nabla \bar{u})$ — тензор сил трения; $K = (\bar{u} \cdot \bar{u})/2$ — удельная кинетическая энергия, $\text{м}^2/\text{с}^2$; T — индекс, указывающий на кососимметричную матрицу; \bar{u} — векторное поле скоростей; μ — динамическая вязкость, $\text{Па} \cdot \text{с}$; τ — время, с ; ∇ — векторный оператор Гамильтона; δ — дельта функция Кронекера; ρ — плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; p — давление, Па ; k — турбулентная кинетическая энергия, $\text{Дж}/\text{кг}$; ε — диссипация турбулентной кинетической энергии воздушного потока, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{с})$; μ_t — турбулентная динамическая вязкость, $\text{Па} \cdot \text{с}$; $\sigma_k = 1$, $\sigma_{\varepsilon RNG} = 0.7179$, $C_{\varepsilon 2 RNG} = 1.68$, $C_M = 0.09$ — постоянные модели турбулентности; P_k , P_{kb} , $C_{\varepsilon 1 RNG}$, $P_{\varepsilon b}$ — величины, определяемые из решений дополнительных уравнений.

Разбиение модели на конечно-элементную сетку проведено в препроцессоре ANSYS Meshing. Размерность сетки — 1 950 000 элементов при 1 047 000 узлах. Качество построенной расчетной конечно-элементной сетки определялось по двум параметрам: ортогональное качество и степень асимметрии, значения которых находятся в рекомендуемых пределах. В рамках принятой $k-\varepsilon$ RNG модели турбулентности величина безразмерного расстояния до стенки модели y^+ должна лежать в пределах от 30 до 300 [15, 16]. Исходя из этого требования определена величина пристеночных ячеек, которая составляет 0.05 м. Решение задачи осуществлялось в нестационарной постановке с использованием расчетного комплекса ANSYS CFX.

График движения поездов включает в себя четыре характерных фазы: торможение перед станцией на течение 20 с, стоянка на станции 20 с, разгон при отходе от станции на протяжении 10 с, движение с постоянной скоростью по перегонному тоннелю. В моделировании принято девять циклов прихода и ухода поезда на станцию и со станции (три полных круга). За это время достигается устойчивый циклический характер воздухообмена. Вычислительный эксперимент проведен для характерной скорости поездов 20 м/с.

Результаты. Для вентиляционных сбоек № 8 и № 12 (рис. 1) определены углы φ вектора средней скорости v_{ave} , входящего в вентсбойку воздушного потока, относительно осей поперечных сечений вентсбойки $A-A$ и $B-B$ (рис. 2, 3) от времени за характерный цикл движения поезда с установившимся воздухообменом, включающий торможение перед станцией, у которой находится рассматриваемая вентсбойка, стоянку на станции, разгон и последующее движение по линии метрополитена до начала следующего торможения у рассматриваемой станции.

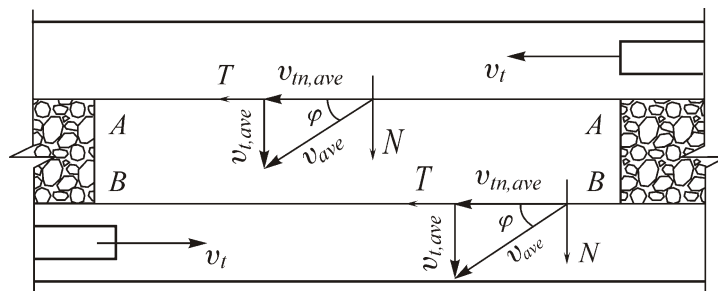


Рис. 2. К определению угла φ в вентсбойках № 8 и № 12: $A-A$, $B-B$ — сечения на входе и на выходе вентсбойки; N — нормальная ось к рассматриваемому сечению; T — перпендикулярная ось к нормали сечения; v_t — скорость поезда; v_{ave} , $v_{n,ave}$ и $v_{t,ave}$ — вектор средней скорости воздуха в сечении, его нормальная и тангенциальная составляющие соответственно. Стрелками N и T показаны их положительные направления

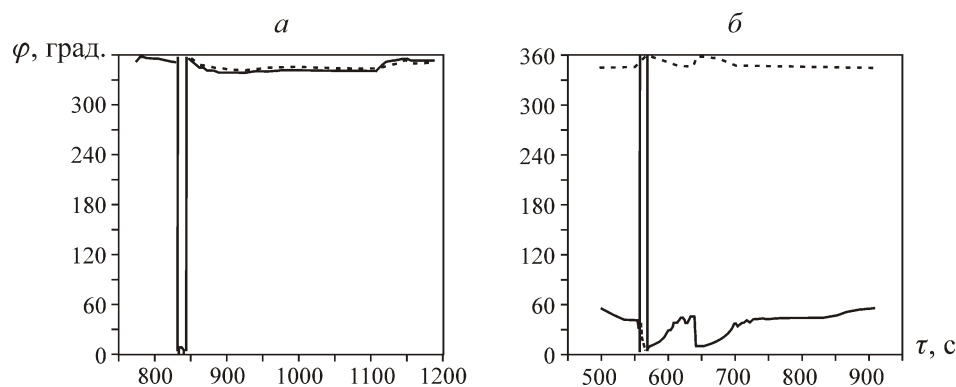


Рис. 3. Значения угла φ для характерного цикла движения поезда с установившимся воздухообменом: *a* — вентсбойка № 8; *б* — вентсбойка № 12, сплошная линия — сечение *A–A*; пунктирная — сечение *B–B*

Из рис. 3 видно, что значение φ для вентсбойки № 8 (при графике движения поездов, обеспечивающих одновременный приход и уход двух поездов на станцию / со станции) при движении поезда за пределами станционного комплекса меняется незначительно и в среднем составляет $\varphi_{A-A} \sim \varphi_{B-B} = 339^\circ$. Для вентсбойки № 12 (соответствует раздельному приходу и уходу двух составов на станцию / со станции) угол в сечении *A–A* изменяется от 19 до 53° , в среднем — $\varphi_{A-A} = 44.5^\circ$, а в сечении *B–B* он варьирует от 341 до 355° , в среднем $\varphi_{B-B} = 345^\circ$. Однако в момент начала движения поезда после стоянки на станции до окончательного ухода поезда из станционного комплекса значение φ меняется более чем на 340° , что показывает разворот потока в вентсбойке вслед уходящему составу. Полученные зависимости изменения угла φ дают возможность сформулировать требования к пространственному размещению, а именно углу установки противопылевых фильтров в вентиляционной сбойке.

ВЫВОДЫ

В работе определены углы вектора средней скорости, входящего в вентсбойку воздушного потока относительно оси поперечного сечения вентсбойки от времени движения поезда по расчетному участку для случаев одновременного и раздельного прихода и ухода поездов на станцию / со станции. Полученные зависимости позволяют выбрать наиболее рациональную компоновку противопылевых фильтров во внутреннем объеме вентиляционной сбойки в зависимости от условий эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Set** of rules 122.13330.2012. Tunnels railway and road, set of rules, Moscow, Ministry of Regional Development, 2012, 132 pp. (in Russian) [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., 2013. — 260 с.]
2. **Sanitary regulations** 2.5.3650-20 “Sanitary and epidemiological requirements for certain types of transport and transport infrastructure facilities”, Approved by the decree of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation of 16.10.2020: date entered 01.01.2021, 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. **Lugin I. V., Kiyantsa L. A., and Oshchepkov T. S.** Circular models of air distribution due to piston effect in subways, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, vol. 773, 7 pp.

4. **Zhao Y., Su X., Ma F., Yu L., and Wang H.** An innovative environmental control system of subway, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2015, no. 147, pp. 120–131.
5. **Minguillóna M. C., Reche C., Martinsa V., Amato F., de Miguel E., Capdevila M., Centelles S., Querol X., and Moreno T.** Aerosol sources in subway environments, *Environmental Research*, 2018, vol. 167, pp. 314–328.
6. **Martins V., Moreno T., Cruz Minguillon M., Barend L. van Drooge, Reche C., Amato F., Eladio de Miguel, Capdevila M., Centelles S., and Quero X.** Origin of inorganic and organic components of PM2.5 in subway stations of Barcelona, Spain, *Environmental Pollution*, 2016, vol. 208, pp. 125–136.
7. **Xiao D., Li B., and Cheng S.** The effect of subway development on air pollution: Evidence from China, *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 275, 10 pp.
8. **Xie Z., Xiao Y., Jiang C., Ren Zh., Li X., and Yu. K.** Numerical research on airflow-dust migration behavior and optimal forced air duct installation position in a subway tunnel during drilling operation, *Powder Technology*, 2021, vol. 338, pp. 176–191.
9. **Ji W., Li X., and Wang Ch.** Composition and exposure characteristics of PM2.5 on subway platforms and estimates of exposure reduction by protective masks, *Environmental Research*, 2021, vol. 197.
10. **Wenjing Ji, Chenghao Liu, Zhenzhe Liu, Chunwang Wang, and Xiaofeng Li.** Concentration, composition, and exposure contributions of fine particulate matter on subway concourses in China, *Environmental Pollution*, 2021, vol. 275.
11. **Roy D., Suk Hyeon Ahn, Tae Kwon Lee, Yong-Chil Seo, and Park J.** Cancer and non-cancer risk associated with PM10-bound metals in subways, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2020, vol. 89.
12. **Olivero-Verbel R., Moreno T., Fernández-Arribas J., Reche C., Minguillón M. C., Martins V., Querol X., Johnson-Restrepo B., and Eljarrat E.** Organophosphate esters in airborne particles from subway stations, *Science of the Total Environment*, 2021, vol. 769.
13. **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.** Об эффекте возникновения циркуляционных колец и их влиянии на воздухораспределение в метрополитене мелкого заложения // ФТПРПИ. — 2010. — № 4. — С. 75–82.]
14. **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.
15. **Baturin O. V., Baturin N. V., and Matveev V. N.** Calculation of the flow of liquids and gases using the universal software complex Fluent, *Training Manual*, Samara, Publishing house of the Samara State Aerospace University 2009, 151 pp. (in Russian) [**Батури́н О. В. Батури́н Н. В., Матвеев В. Н.** Расчет течений жидкостей и газов с помощью универсального программного комплекса Fluent / Учеб. пособие. — Самара: Изд-во СГАУ, 2009. — 151 с.]
16. **Fedorova N. N., Valger S. A., Danilov M. N., and Zakharova Yu. V.** Fundamentals of work in ANSYS 17, Moscow, DMK Press, 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.]