

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ПРИСТАНЦИОННОЙ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СБОЙКЕ МЕТРОПОЛИТЕНА ОТ ПОРШНЕВОГО ДЕЙСТВИЯ ПОЕЗДОВ

Л.А. Кияница¹, Б.А. Унаспеков²

¹ Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения РАН,
Новосибирск, Россия, e-mail: lavrentij.kijanitza@yandex.ru

² Казахский национальный исследовательский технический университет
им. К.И. Сатпаева, Алматы, Республика Казахстан

Аннотация: Представлены результаты численного исследования воздухораспределения в пристанционной вентиляционной сбойке метрополитена. Целью исследования является определение закономерностей воздухораспределения в вентсбойке, что позволит сформулировать требования к параметрам работы фильтрационного оборудования. Необходимость проведения исследований вызвана тем, что в метрополитенах концентрация взвешенной пыли значительно превышает предельно допустимую, что вызывает хронические болезни органов дыхания пассажиров, и особенно сотрудников метрополитена. В работе определены закономерности изменения нормальной составляющей скорости воздуха в поперечном сечении вентиляционной сбойки и структура воздушного потока по высоте сбойки для режима одиночного прибытия поездов на станцию, как наиболее часто встречающегося. Выявлено, что воздухораспределение в вентсбойке при движении поездов в значительной степени неравномерно, а именно направление скорости воздуха имеет знакопеременный характер, и нормальная составляющая скорости воздуха изменяется локально от $-17,5$ до $+14,7$ м/с при среднем значении, не превышающем $2,4$ м/с при скорости движения поездов 20 м/с. Распределение нормальной составляющей скорости воздуха по высоте также имеет весьма неоднородную структуру, что необходимо учитывать при конструировании фильтрационного тоннельного оборудования. На основании полученных данных по воздухораспределению определен комплекс требований по размещению фильтрационного оборудования в вентсбойке.

Ключевые слова: метрополитен, вентиляция, очистка воздуха от пыли, кольцевые модели, поршневой эффект, воздухораспределение, пристанционная вентиляционная сбойка, фильтрационное оборудование.

Благодарность: Работа выполнена в рамках проекта ФНИ номер гос. регистрации № 121052500147-6 и при финансовой поддержке Комитета науки МОН РК (грант № AP0926084/2).

Для цитирования: Кияница Л. А., Унаспеков Б. А. Определение параметров воздухораспределения в пристанционной вентиляционной сбойке метрополитена от поршневого действия поездов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 12. – С. 99–109. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_12_0_99.

Estimate of air distribution in ventilation tunnel between subway station as function of piston effect

L.A. Kiyanitsa¹, B.A. Unaspekov²

¹ Chinakal Institute of Mining of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia, e-mail: lavrentij.kijanitz@yandex.ru

² K.I. Satpayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, Republic of Kazakhstan

Abstract: This article describes the numerical studies into air distribution in ventilation tunnel between subway stations. The studies aimed to determine regular air distribution patterns in the ventilation tunnel to formulate requirements for the filtration equipment operation. The relevance of the studies is conditioned by the fact that respirable dust content of subway air greatly exceeds the maximum allowable concentrations, which causes chronic respiratory diseases of passengers and, especially, subway personnel. The laws of change in the normal air velocity in the cross section of the ventilation tunnel and the structure of air flow along the height of the vent tunnel are determined for the mode of single train arrival at the station, which the most often event in subways. It is found that air distribution in the ventilation tunnel between subway stations during movement of trains is greatly nonuniform, namely, the air velocity direction is alternating, and the normal air velocity changes locally from 17.5 to +14.7 m/s, at the average value not higher than 2.4 m/s, at the train speed of 20 m/s. The normal air velocity distribution along the height is also highly nonuniform, which should be taken into account in engineering the air filtration equipment for vent tunnels. Based on the obtained results on air distribution, the arrangement requirements are set for the filtration equipment in ventilation tunnels between subway stations.

Key words: subway, ventilation, air purification from dust, ring-shaped models, piston effect, air distribution, ventilation tunnel between subway stations, filtration equipment.

Acknowledgements: The study was carried out within the framework of R&D Project No. 121052500147-6 and was supported by the Committee of Science of the Ministry of Education and Sciences of the Republic of Kazakhstan, Grant No. AR0926084/2.

For citation: Kiyanitsa L. A., Unaspekov B. A. Estimate of air distribution in ventilation tunnel between subway station as function of piston effect. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(12):99-109. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_12_0_99.

Введение

Метрополитены — один из самых совершенных видов городского транспорта, позволяющий справиться с постоянно возрастающим пассажиропотоком в крупных мегаполисах. Однако к метрополитену, как к важному объекту транспортной инфраструктуры, предъявляется ряд санитарно-гигиенических требований по поддержанию параметров микроклимата, в том числе по пы-

левому фактору. Концентрация мелко-дисперсной пыли в пассажирских помещениях, помещениях персонала и тоннельных сооружениях должна быть не выше норм ПДК [1, 2]. Источниками появления пыли в метрополитенах служат: система тоннельной вентиляции, эрозия стенок туннелей, износ тормозных колодок и т.д. Наиболее опасными концентрациями пыли являются такие

концентрации, как PM1, PM2,5, PM5 и PM10 (1, 2,5, 5 и 10 мкм соответственно). Концентрации PM2,5 и ниже могут проникать сквозь биологический барьер человека и всасываться в кровь. Ряд отечественных и зарубежных исследований [3–15] показывает, что фактические концентрации мелкодисперсной пыли значительно превышают допустимый уровень, что в долгосрочной перспективе провоцирует хронические заболевания органов дыхания у пассажиров, и в особенности у сотрудников метрополитена. Наиболее распространенный способ пылеудаления – это смыв пыли с тоннельной обделки или сдвиг ее специальным пылесосом. Эти операции проводятся ночью, в период отсутствия поездов в тоннелях. Однако этот способ не обладает необходимой эффективностью.

К перспективным методам обеспыливания тоннельного воздуха относится

улавливание пыли в мокрых или сухих лабиринтных фильтрах [16]. Возможным местом установки фильтров являются пристанционные вентиляционные сбойки, так как через них проходят значительные по расходу воздуха циркуляционные потоки, и сами фильтры не будут уменьшать внутренний габарит тоннеля и препятствовать движению поездов. Из-за сложной топологии и наличия отрывных зон, структура воздушного потока, градиент скоростей воздуха в поперечном сечении вентиляционных сбоек и, соответственно, обоснование мест установки фильтров в вентсбойке требует дополнительного исследования.

Расчетная модель и методы исследования

Расчетная модель участка метрополитена состоит из трех станционных комплексов и трех перегонных участков однопутных тоннелей. Для учета аэро-

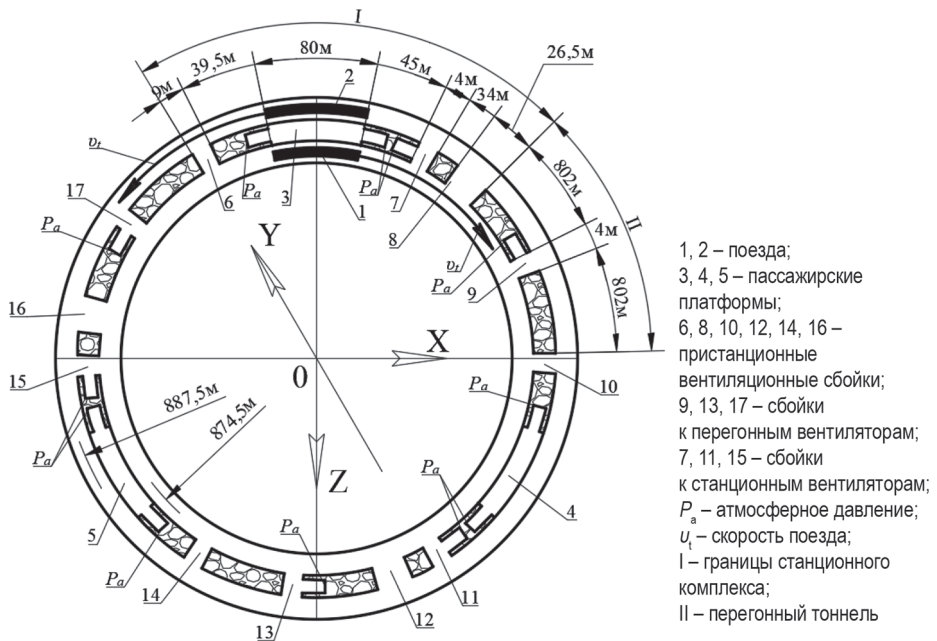


Рис. 1. Геометрические характеристики и граничные условия расчетной модели аэродинамических процессов

Fig. 1. Geometrical characteristics and boundary conditions in the analytical aerodynamics model

динамического сопротивления тоннелей и станций протяженной линии метро, не вошедших в исследуемый участок, использована кольцевая модель [16] 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 [17–18] поезд оказывает 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.

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

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

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

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

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

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} + \nabla(\bar{u} \cdot \varepsilon \cdot \rho) = \nabla \left(\left[\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon RNG}} \right] \nabla \varepsilon \right) +$$

$$+ \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1 RNG} P_k - C_{\varepsilon 2 RNG} \varepsilon \rho + C_{\varepsilon 1 RNG} P_{\varepsilon b})$$

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

В уравнениях (1)–(6)

$\Lambda = \mu(\nabla \bar{u} + (\nabla \bar{u})^T - (2/3)\delta \nabla \bar{u})$ – тензор

сил трения; $K = \frac{1}{2}(\bar{u} \cdot \bar{u})$ – удельная кинетическая энергия, $\text{м}^2/\text{с}^2 \cdot \text{с}$; T – индекс, указывающий на кососимметричную матрицу; 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, $\text{Па} \cdot \text{с}$; $\sigma_k = 1$, $\sigma_{\varepsilon RNG} = 0,7179$, $C_{\varepsilon 2 RNG} = 1,68$, $C_{\mu} = 0,09$ – 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 произведено 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 - ε RNG модели турбулентности величина безразмерного расстояния до стенки модели y^+ должна лежать в пределах от 30 до 300 [19, 20]. Исходя из этого требования, определена величина пристеночных ячеек, которая составляет 0,05 м. Решение задачи производилось в нестационарной постановке с использованием расчетного комплекса ANSYS CFX.

График движения поездов включает в себя 4 характерных фазы: торможение перед станцией на протяжении 20 с, стоянка на станции на протяжении 30 с, разгон при отходе от станции на

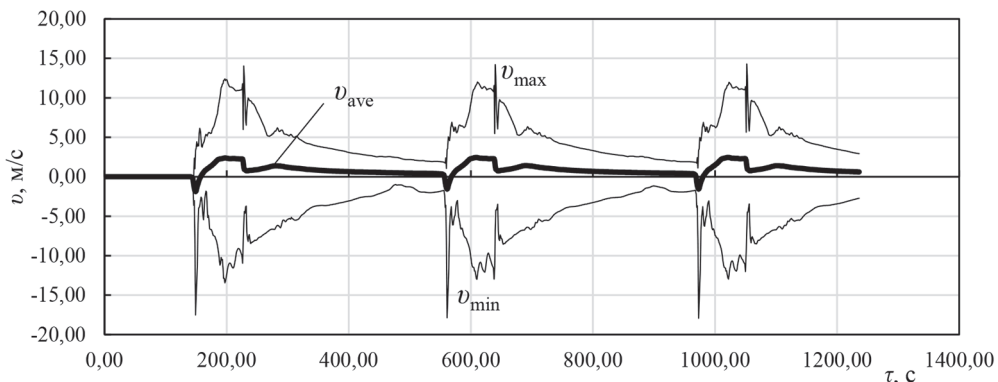


Рис. 2. Минимальное v_{min} , среднее v_{ave} и максимальное v_{max} значения нормальной скорости воздуха в вентсбойке № 12 для скорости движения поезда $v_t = 20$ м/с

Fig. 2. Minimum v_{min} , average v_{ave} and maximum v_{max} values of normal air velocity in vent tunnel No. 12 at train speed $v_t = 20$ m/s

протяжении 10 с, движение с постоянной скоростью по перегонному тоннелю. В моделировании принято 9 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 12, 20 и 25 м/с.

Результаты

В процессе исследования получены минимальные, средние и максимальные значения проекции скорости воздуха на

нормаль к поперечному сечению вентиляционной сбойки № 12 (случай одиночного прибытия поездов на станцию) и поле скоростей в ее поперечном сечении в зависимости от скорости движения поездов. На рис. 2 приведены полученные максимальные, минимальные и средние значения проекции скорости воздуха на нормаль к поперечному сечению вентсбойки № 12 для скорости движения поездов $v_t = 20$ м/с, а рис. 3 показана та же величина за один цикл при скорости движения поездов $v_t = 12, 20, 25$ м/с. За начало цикла принято начало торможения поезда перед станци-

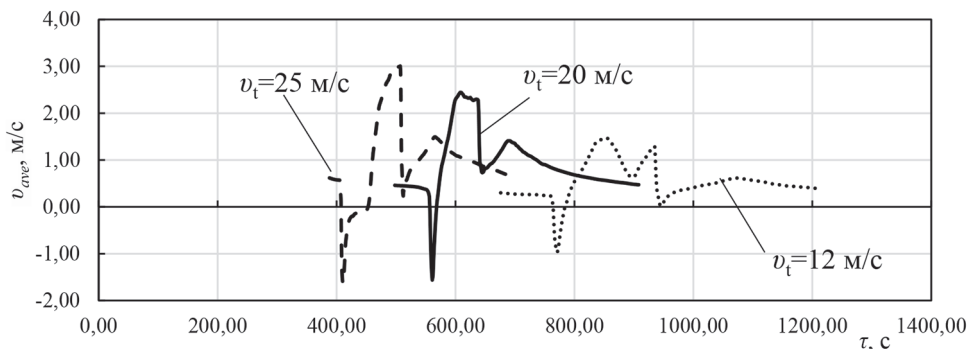


Рис. 3. Среднее значение нормальной скорости воздуха v_{ave} при скорости движения поездов $v_t = 12, 20, 25$ м/с в вентсбойке № 12 за один проход поезда по кольцу

Fig. 3. Average normal air velocity v_{ave} at train speeds $v_t = 12, 20$ and 25 m/s in vent tunnel No. 12 per one subway ring pass by train

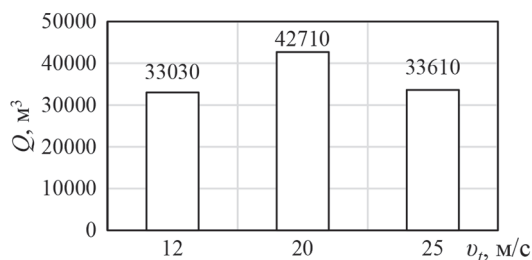


Рис. 4. Количество воздуха, прошедшее через вентсбойку № 12 за один проход поезда, при скорости движения поездов $v_t = 12, 20, 25$ м/с

Fig. 4. Air flow rate in vent tunnel No. 12 per single train pass at train speeds $v_t = 12, 20$ and 25 m/s

ей, окончание цикла — начало следующего торможения этого же поезда на этой же станции. На рис. 4 приведено количество воздуха, перемещаемое за один проход поезда (от начала торможения перед станцией 4 до начала следующего торможения перед станцией 4) через вентсбойку № 12. На рис. 5 приведены изополя проекции скорости воздуха на нормаль к поперечному сечению вентиляционной сбойки для характерных моментов движения поездов. Рис. 5 достаточно полно характеризует распределение нормальной составляющей скорости воздуха по высоте вентсбойки.

Обсуждение

Проведенный вычислительный эксперимент показал, что поле скоростей воздушных потоков в пристанционной вентсбойке имеет сложную пространственно-неоднородную структуру (рис. 5), а именно: наличие зон с разнонаправленным движением воздуха и значительный градиент изменения скорости по высоте вентсбойки с переходом значения нормальной составляющей скорости через «0». На рис. 2 показаны минимальные, средние и максимальные значения нормальной составляющей скорости воздуха в вентсбойке № 12 при скорости движения поезда 20 м/с. Исходя из этих значений можно сделать вывод о значительной неоднородности

поля скоростей воздушного потока как по направлению, так и по абсолютной величине, при этом максимальные значения проекции скорости воздуха на нормаль к поперечному сечению вентсбойки достигают величин (в зависимости от направления) от $-17,5$ до $14,7$ м/с при среднем значении, не превышающем $2,4$ м/с. Из-за значительной неоднородности потока в вентсбойке как по величине так по направлению, в конструкции фильтрационного оборудования необходимо предусматривать специальный направляющий аппарат, обеспечивающий приток тоннельного воздуха на фильтроэлемент под оптимальным углом.

Необходимо отметить, что при скорости поезда 20 м/с через вентсбойку за один его проход перемещается больший расход воздуха, чем при скорости движения поезда 12 и 25 м/с. Расход воздуха за один проход поезда численно равен произведению площади поперечного сечения вентсбойки и площади фигуры, ограниченной линией средней скорости воздуха в сбойке (рис. 3) и осью абсцисс, для каждой из рассматриваемых скоростей поезда:

$$Q = F \cdot \int_{\tau_1}^{\tau_2} v_{ave,i} \cdot d\tau = F \cdot \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{2} (v_{ave,i} + v_{ave,i-1}) (\tau_i - \tau_{i-1}) \right], (7)$$

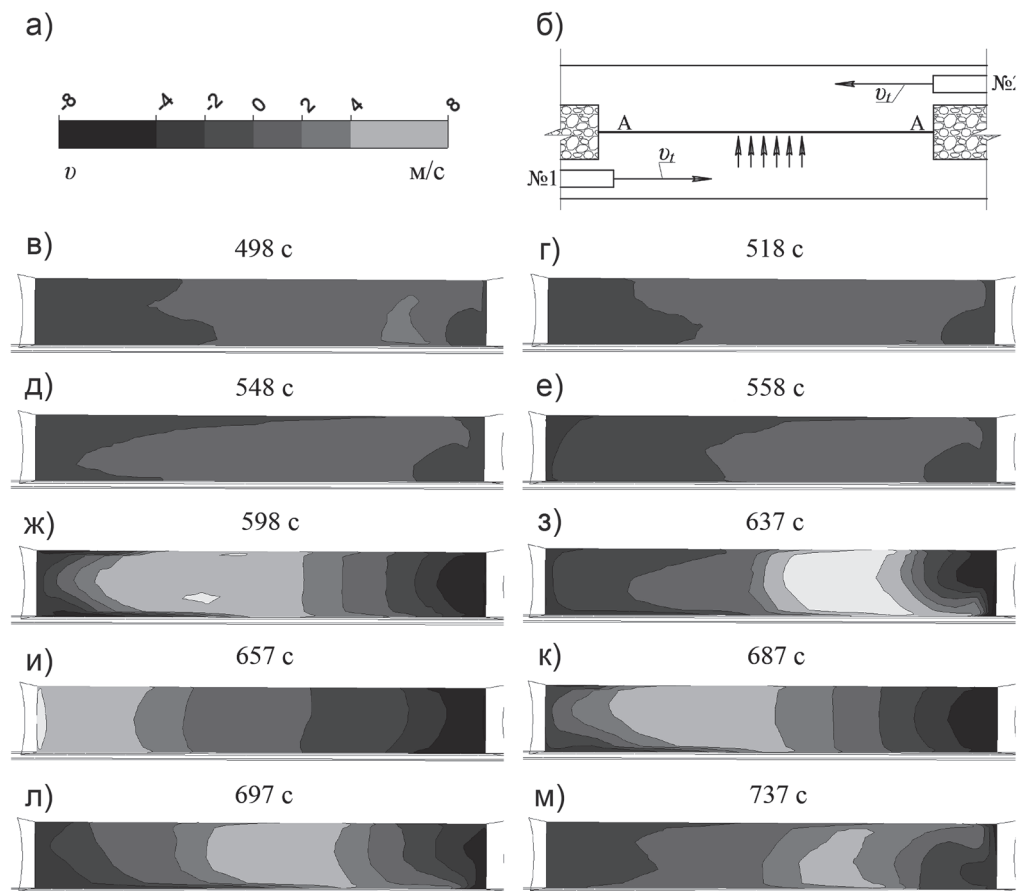


Рис. 5. Изополя нормальной составляющей средней скорости воздуха в поперечном сечении А-А вентсбойки № 12 (направление взгляда согласно б) при скорости движения поездов $v_t = 20$ м/с: легенда (а); вид сверху на вентсбойку № 12 с местом установки поперечного сечения и направлением движения поездов (б); изополя в характерные моменты времени (начало торможения поезда № 1 перед станцией (в); начало стоянки поезда № 1 на станции (г); начало разгона поезда № 1 на станции (д); окончание разгона поезда № 1 после станции (е); равноудаленное нахождение поездов № 1 и № 2 относительно станции, на станции поездов нет (ж); начало торможения поезда № 2 перед станцией (з); начало стоянки поезда № 2 на станции (и); начало разгона поезда № 2 на станции (к); окончание разгона поезда № 2 после станции (л); равноудаленное нахождение поездов № 1 и № 2 относительно станции, на станции поездов нет (м)) (в–м)

Fig. 5. Isofields of normal average air field velocity in cross-section A-A of vent tunnel No. 12 (in direction of b) at train speed $v_t = 20$ m/s: legend (a); top view of vent tunnel No. 12 with details of cross-section and train movement direction (b); isofields at representative moments of time (train 1 begins decelerating in front of the station (v); train 1 stops at the station (g); train 1 starts accelerating (d); train 1 stops accelerating after the station (e); trains 1 and 2 are equally distant from the station, there are no trains at the station (zh); train 2 starts decelerating in front of the station (z); train 2 arrives and stops at the station (i); train 2 starts accelerating at the station (k); train 2 stops accelerating after the station (l); trains 1 and 2 are equally distant from the station, there are no trains at the station (m)) (v – m)

где i — количество временных участков разбиения, шт; $v_{ave,i}$ — расход воздуха в i -й момент времени, м/с; $v_{ave,i-1}$ — расход воздуха в i -й момент времени, м³/с; τ — время, с; τ_1, τ_2 — время начала и окончания прохода поезда, с; F — площадь поперечного сечения вентсбойки, м².

Экстремум расхода воздуха через вентсбойку за один проход поезда именно при скорости поезда 20 м/с объясняется тем, что:

- скорость воздуха в вентсбойке при скорости поезда 20 м/с значительно выше, чем при скорости движения поезда 12 м/с;
- скорость воздуха в вентсбойке при движении поезда со скоростью 25 м/с незначительно выше, чем при движении со скоростью 20 м/с, но при этом время одного прохода поезда по расчетному участку значительно меньше;
- начиная со скорости поезда 20 м/с и выше, на расход воздуха через вентсбойку за один проход начинает в большей степени влиять не скорость поезда, а время движения по перегонному тоннелю.

Это подтверждается тем, что для скорости поезда 20 м/с интеграл имеет большее значение, чем для скорости поезда 25 м/с. Исходя из вышесказанного, фильтрационное оборудование, установленное в вентсбойке, должно эффективно выполнять свою функцию в потоке воздуха, характеризующегося значительной неравномерностью поля скоростей как по величине, так и по направлению и распределению по высоте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. СП 2.5.3650-20 Санитарно-эпидемиологические требования к отдельным видам транспорта и объектам транспортной инфраструктуры, утв. Пост. Главного государственного санитарного врача РФ от 16.10.2020, дата введ. 01.01.2021. — М., 2020. — 101 с.

Заключение

- Поле скоростей воздушных потоков в пристанционной вентсбойке для случая одиночного прибытия поездов на станцию имеет сложную пространственно-неоднородную структуру, заключающуюся в наличии зон с разнонаправленным движением воздуха по высоте и зон с локальным ускорением потока.
- Значительная неоднородность поля скоростей воздушного потока в вентсбойке для случая одиночного прибытия поездов на станцию также характеризуется значительным превышением максимальных значений скорости воздуха над средним значением, а именно, максимальные значения проекции векторов скорости на нормаль к оси вентсбойки достигают (в зависимости от направления вектора скорости) от –17,5 м/с до 14,7 м/с при среднем значении, не превышающем 2,4 м/с.
- Из-за значительной неоднородности потока в вентсбойке как по величине, так по направлению, в конструкции фильтрационного оборудования необходимо предусматривать специальный направляющий аппарат, обеспечивающий приток тоннельного воздуха на фильтроэлемент под оптимальным углом.
- Фильтрационное оборудование, установленное в вентсбойке, должно эффективно выполнять свою функцию в потоке воздуха, характеризующегося значительной неравномерностью поля скоростей как по величине, так и по направлению, а также распределению по высоте.

3. Хунашвили Н. Г., Кверенчиладзе Р. Г., Цимакурдидзе М. П., Бакрадзе Л. Ш., Цимакурдидзе Майя 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. Сазонова А. М. Исследование пылевого фактора производственной среды метрополитена / Современные подходы к обеспечению гигиенической, санитарно-эпидемиологической и экологической безопасности на железнодорожном транспорте. Сборник трудов ученых и специалистов транспортной отрасли. — М., 2016. — С. 79–85

5. 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 плюс. — 2018. — Т. 7. — № 3(43). — С. 145–149.

6. Копытенкова О. И., Шилова Е. А., Сазонова А. М. Комплексный подход к оценке биодеструктивных факторов при освоении подземного пространства // Науковедение. — 2015. — Т. 7. — № 1. — С. 1–16.

7. Zhao Yang, Xiangchao Su, Feng Ma, Longqing Yu, Hongna Wang An innovative environmental control system of subway // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2015, vol. 147, pp. 120–131.

8. Minguillón M. C., Reche C., Martins V., Amato F., de Miguel E., Capdevila M., Centelles S., Querol X., Moreno T. Aerosol sources in subway environments // Environmental Research. 2018, vol. 167, pp. 314–328.

9. Martins V., Moreno T., Minguillón M. C., van Drooge B. L., Reche C., Amato F., de Miguel E., Capdevila M., Centelles S., Quero X. Origin of inorganic and organic components of PM_{2.5} in subway stations of Barcelona, Spain // Environmental Pollution. 2016, vol. 208, pp. 125–136.

10. De Xiao, Baoxi Li, Shixiong Cheng The effect of subway development on air pollution: Evidence from China // Journal of Cleaner Production. 2020, vol. 275.

11. Zhuwei Xie, Yimin Xiao, Congxin Jiang, Zhili Ren, Xueqin Li, Kecheng Yu. 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.

12. Wenjing Ji, Xiaofeng Li, Chunwang Wang Composition and exposure characteristics of PM_{2.5} on subway platforms and estimates of exposure reduction by protective masks // Environmental Research. 2021, vol. 197, article 111042.

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. 2021, vol. 275, article 116627.

14. Debananda Roy, Suk Hyeon Ahn, Tae Kwon Lee, Yong-Chil Seo, Joonhong Park Cancer and non-cancer risk associated with PM₁₀-bound metals in subways // Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2020, vol. 89, article 102618.


15. Olivero-Verbel R., Moreno T., Fernández-Arribas J., Reche C., Minguillón M. C., Martins V., Querol X., Johnson-Restrepo B., Eljarrat E. Organophosphate esters in airborne particles from subway stations // Science of The Total Environment. 2021, vol. 769, no. 4, article 145105.

16. Lugin I. V., Kiyanytsa L. A., Oshchepkov T. S. Circular models of air distribution due to piston effect in subways // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2021, vol. 773, no. 1, article 012046. DOI: 10.1088/1755-1315/773/1/012046.

17. Krasnyuk A. M., Lugin I. V., 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.

18. Krasnyuk A. M., Lugin I. V., Pavlov S. A. Experimental research into air distribution in a terminal subway station // Tunnelling and Underground Space Technology. 2019, vol. 85, pp. 21–28.

19. Батури́н О. В., Батури́н Н. В., Матвеев В. Н. Расчет течений жидкостей и газов с помощью универсального программного комплекса Fluent. Учебное пособие. — Самара: Изд-во СГАУ, 2009. — 151 с.

20. Федорова Н. Н., Вальгер С. А., Данилов М. Н., Захарова Ю. В. Основы работы в ANSYS 17. — М.: ДМК Пресс, 2017. — 210 с. 

REFERENCES

1. *Svod pravil 120.13330.2012. Metropoliteny. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 32-02-2003* [Set of rules 122.13330.2012. Subways. Updated version of SNiP 32-02-2003], Moscow, 2013, 260 p. [In Russ].

2. *SP 2.5.3650-20 Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k otdel'nym vidam transporta i ob"ektam transportnoy infrastruktury* [Sanitary regulations 2.5.3650-20 Sanitary and epidemiological requirements for certain types of transport and transport infrastructure facilities], Moscow, 2020, 101 p. [In Russ].

3. Khunashvili N. G., Kverenchkhiladze R. G., Tsimakuridze M. P., Bakradze L. Sh., Tsimakuridze Mayya P. Clinical and hygienic parallels in the study of working conditions and health status of employees of the Tbilisi. *Allergology and Immunology*. 2010, vol. 11, no. 2, pp. 135–136. [In Russ].

4. Sazonova A. M. Investigation of the dust factor of the metro production environment. *Sovremennyye podkhody k obespecheniyu gigienicheskoy, sanitarno-epidemiologicheskoy i ekologicheskoy bezopasnosti na zheleznodorozhnom transporte. Sbornik trudov uchenykh i spetsialistov transportnoy otrasli* [Modern approaches to ensuring hygienic, sanitary-epidemiological and environmental safety in railway transport. Collection of works of scientists and specialists of the transport industry], Moscow, 2016, pp. 79–85

5. Sachkova O. S., Matveeva T. V., Zubrev N. I., Ustinova M. V., Kashintseva V. L. Development of measures to improve the working conditions of tunnel workers. *XXI century: resumes of the past and challenges of the present plus*. 2018, vol. 7, no. 3(43), pp. 145–149. [In Russ].

6. Kopytenkova O. I., Shilova E. A., Sazonova A. M. An integrated approach to the assessment of bio-structural factors in the development of underground space. *Naukovedenie*. 2015, vol. 7, no. 1, pp. 1–16. [In Russ].

7. Zhao Yang, Xiangchao Su, Feng Ma, Longqing Yu, Hongna Wang An innovative environmental control system of subway. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2015, vol. 147, pp. 120–131.

8. Minguillón M. C., Reche C., Martinsa V., Amato F., de Miguel E., Capdevila M., Centelles S., Querol X., Moreno T. Aerosol sources in subway environments. *Environmental Research*. 2018, vol. 167, pp. 314–328.

9. Martins V., Moreno T., Minguillón M. C., van Drooge B. L., Reche C., Amato F., de Miguel E., Capdevila M., Centelles S., Quero X. Origin of inorganic and organic components of PM_{2.5} in subway stations of Barcelona, Spain. *Environmental Pollution*. 2016, vol. 208, pp. 125–136.

10. De Xiao, Baoxi Li, Shixiong Cheng The effect of subway development on air pollution: Evidence from China. *Journal of Cleaner Production*. 2020, vol. 275.

11. Zhuwei Xie, Yimin Xiao, Congxin Jiang, Zhili Ren, Xueqin Li, Kecheng Yu. 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.

12. Wenjing Ji, Xiaofeng Li, Chunwang Wang Composition and exposure characteristics of PM_{2.5} on subway platforms and estimates of exposure reduction by protective masks. *Environmental Research*. 2021, vol. 197, article 111042.

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*. 2021, vol. 275, article 116627.

14. Debananda Roy, Suk Hyeon Ahn, Tae Kwon Lee, Yong-Chil Seo, Joonhong Park Cancer and non-cancer risk associated with PM10-bound metals in subways. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2020, vol. 89, article 102618.

15. Olivero-Verbel R., Moreno T., Fernández-Arribas J., Reche C., Minguillón M. C., Martins V., Querol X., Johnson-Restrepo B., Eljarrat E. Organophosphate esters in airborne particles from subway stations. *Science of The Total Environment*. 2021, vol. 769, no. 4, article 145105.

16. Lugin I. V., Kiyantsa L. A., Oshchepkov T. S. Circular models of air distribution due to piston effect in subways. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 773, no. 1, article 012046. DOI: 10.1088/1755-1315/773/1/012046.

17. Krasnyuk A. M., Lugin I. V., 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.

18. Krasnyuk A. M., Lugin I. V., Pavlov S. A. Experimental research into air distribution in a terminal subway station. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019, vol. 85, pp. 21 – 28.

19. Baturin O. V., Baturin N. V., Matveev V. N. *Raschet techeniy zhidkostey i gazov s pomoshch'yu universal'nogo programmnoy kompleksa Fluent*. Uchebnoe posobie [Calculation of the flow of liquids and gases using the universal software complex Fluent. Training Manual], Samara, Izd-vo SGAU, 2009, 151 p.

20. Fedorova N. N., Val'ger S. A., Danilov M. N., Zakharova Yu. V. *Osnovy raboty v ANSYS 17* [Fundamentals of work in ANSYS 17], Moscow, DMK Press, 2017, 210 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кияница Лаврентий Александрович — канд. техн. наук,
научный сотрудник,

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала
Сибирского отделения РАН,
e-mail: lavrentij.kijanitza@yandex.ru,

Унаспеков Беригбай Акибаевич — д-р техн. наук,
академик Национальной инженерной академии
Республики Казахстан,
Казахский национальный исследовательский
технический университет им. К.И. Сатпаева,
Республика Казахстан.

Для контактов: Кияница Л.А., e-mail: lavrentij.kijanitza@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

L.A. Kiyantsa, Cand. Sci. (Eng.), Researcher,
e-mail: lavrentij.kijanitza@yandex.ru,
Chinakal Institute of Mining of Siberian Branch
of Russian Academy of Sciences,
630091, Novosibirsk, Russia,

B.A. Unaspekov, Dr. Sci. (Eng.),
Academician of National Engineering Academy
of the Republic of Kazakhstan,
K.I. Satpayev Kazakh National Research Technical University,
050013, Almaty, Republic of Kazakhstan.

Corresponding author: L.A. Kiyantsa, e-mail: lavrentij.kijanitza@yandex.ru.

Получена редакцией 02.09.2021; получена после рецензии 30.09.2021; принята к печати 10.11.2021.
Received by the editors 02.09.2021; received after the review 30.09.2021; accepted for printing 10.11.2021.