

О СТРУКТУРЕ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА В ПРИСТАНЦИОННЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СБОЙКАХ МЕТРОПОЛИТЕНОВ

Лаврентий Александрович Кияница

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук (ИГД СО РАН), Россия, 630091, Новосибирск, Красный проспект 54, кандидат технических наук, младший научный сотрудник лаборатории рудничной аэродинамики, тел. (903)049-31-85, e-mail: Lavrentij.Kijanitz@yandex.ru

Иван Владимирович Лугин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук (ИГД СО РАН), Россия, 630091, Новосибирск, Красный проспект 54, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории рудничной аэродинамики, тел. (383)205-30-30(доб.179), e-mail: ivlugin@misd.ru

Александр Михайлович Красюк

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук (ИГД СО РАН), Россия, 630091, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории рудничной аэродинамики, тел. (913)742-74-01, e-mail: am.krasuk@gmail.com

Одним из важных микроклиматических критериев комфорта и безопасности пассажиро-перевозок в метрополитенах является концентрация пыли в зоне пребывания пассажиров и персонала. Известно, что концентрация мелкодисперсной пыли в метрополитенах значительно превышена относительно допустимого нормативного уровня. Для снижения концентрации пыли до уровня ПДК необходимо осуществлять фильтрацию тоннельного воздуха не только для систем местной вентиляции помещений персонала, но и для тоннельной вентиляции и общеобменной вентиляции пассажирских помещений станций. Одним из перспективных мест установки фильтров являются пристанционные вентиляционные сбойки, так как через них проходят значительные по расходу воздуха циркуляционные потоки. Для определения типа и параметров фильтров, необходимо знать величину и направление скорости воздушного потока, т.е. структуру его поля скоростей. 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 проведения отдельного исследования. В работе обоснованы: декомпозиционный подход к математическому моделированию аэродинамических процессов путем перехода от линейной разомкнутой модели линии метрополитена к замкнутой кольцевой; геометрические параметры принятой расчетной модели; математическая постановка задачи. Методами вычислительной аэродинамики определены минимальные, средние и максимальные проекции скорости воздуха на нормаль к поперечному сечению вентсбойки и расходы воздуха через это сечение, что позволяет обосновать требования к размещению и рабочим параметрам фильтрационного оборудования.

Ключевые слова: метрополитен, тоннельная вентиляция, пыль, кольцевые модели, поршневой эффект, воздухораспределение, пристанционная вентиляционная сбойка

ON AIR FLOW STRUCTURE IN STATION VENTILATION CONNECTIONS OF SUBWAYS

Lavrentiy A. Kiyanitsa

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand. Sci. (Eng.), Junior Researcher, Mine Aerodynamics Laboratory, office: +7 (903)049-31-85, e-mail: Lavrentij.Kijanitz@yandex.ru

Ivan V. Lugin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Leading Researcher, Mine Aerodynamics Laboratory, office: +7 (383)205-30-30 (ext.179), e-mail: ivlugin@misd.ru

Alexander M. Krasnyuk

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Mine Aerodynamics Laboratory, office: +7 (913)742-74-01, e-mail: am.krasuk@gmail.com

One of the important microclimatic criteria for the comfort and safety of passenger transportation in subways is dust concentration in passenger and staff area. It is known that fine dust concentration in subways is significantly exceeded relative to the permissible regulatory level. To reduce the dust concentration to the maximum allowable level, it is necessary to filter the tunnel air not only for the systems of local ventilation of staff rooms, but also for tunnel ventilation and general ventilation of passenger rooms at the stations. It is better to install filters in station ventilation connections, since significant circulating air flows pass through them. To determine the type and parameters of filters, it is required to know the magnitude and direction of an airflow rate, i.e. the structure of its velocity field. Due to the complex topology and presence of separation zones, the airflow structure, gradient of air velocities in the cross-section of ventilation connections and, accordingly, justification of filter installation locations in a ventilation connection requires a separate study. The paper substantiates a decomposition approach to mathematical modeling of aerodynamic processes by transition from a linear open-loop model of the subway line to a closed circular one; geometric parameters of the adopted design model; mathematical statement of the problem. Computational aerodynamics methods allowed determining the minimum, average and maximum projections of air velocity on the normal to the cross section of a ventilation connection and air flows through this cross section. This makes it possible to justify the requirements for the placement and operating parameters of the filtration equipment.

Keywords: subway, tunnel ventilation, dust, circular models, piston effect, air distribution, station ventilation connection

Введение

К метрополитенам, как к сооружениям с массовым пребыванием людей, предъявляется ряд нормативных требований по обеспечению требуемых параметров микроклимата в зоне пребывания пассажиров и персонала [1, 2]. Немаловажным фактором комфортного пребывания пассажиров и персонала в метрополитене является концентрация мелкодисперсной пыли. Ряд исследований показал, что концентрация пыли в метрополитенах значительно превышает значение ПДК [3-6]. Из этого следует, что тоннельный воздух в метрополитенах необходимо дополнительно очищать от пыли. В отечественной и зарубежной печати

присутствует достаточно много работ по исследованию систем вентиляции станций и тоннелей метрополитена [7-12], однако в них не уделяется внимание пылевому фактору в метрополитене. Работы [13, 14] посвящены исследованию фракционного и химического состава пыли в метрополитенах, но методы и способы борьбы с пылью в должной мере не освещаются. Поэтому задача по обоснованию методов обеспыливания тоннельного воздуха весьма актуальна.

К перспективным методам обеспыливания тоннельного воздуха можно отнести улавливание пыли в мокрых или сухих лабиринтных фильтрах [15]. Одним из перспективных мест установки фильтров являются пристанционные вентиляционные сбойки, так как через них проходят значительные по расходу воздуха циркуляционные потоки, что позволяет не использовать дополнительные источники тяги и повысить энергоэффективность системы вентиляции. 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.

Целью работы является определение поля скоростей воздуха в вентиляционной пристанционной сбойке в зависимости от скорости движения поездов и установление закономерностей пространственной структуры потока в вентсбойке.

Методы и материалы

К исследованию принят участок метрополитена, состоящий 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 [15], как метод топологической декомпозиции линии. Такой подход уменьшает размер расчетного участка с сохранением аэродинамического сопротивления соседних перегонов и станций без потерь точности расчета [15, 16]. Выбор именно трех станционных комплексов и трех участков перегонных тоннелей обоснован тем, что согласно [7], 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.

Решение базируется на численном решении системы уравнений (1) – (3) с применением $k-\varepsilon$ RNG модели турбулентности (уравнения (4) – (6)) методом контрольных объемов. Теплообменные процессы в модели не учитываются, так как не представляют интереса для данного исследования.

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

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

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

В уравнениях (1) – (3) $\Lambda = \mu(\nabla\vec{u} + (\nabla\vec{u})^T - (2/3)\delta\nabla\vec{u})$ – тензор сил трения, $K = \frac{1}{2}(\vec{u} \cdot \vec{u})$ – удельная кинетическая энергия, $\text{м}^2/\text{с}^2$, °C , T – индекс, указывающий на кососимметричную матрицу, \vec{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 .

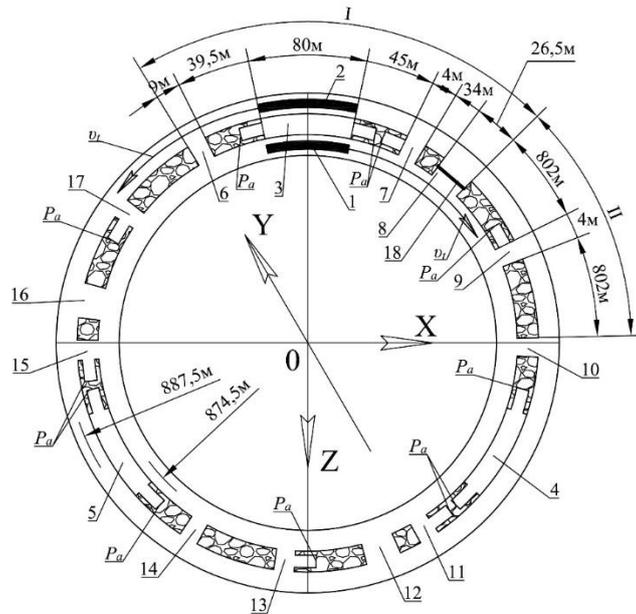


Рис. 1. Геометрические характеристики и граничные условия расчетной модели аэродинамических процессов. На рисунке:

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 стационарным вентиляторам, 18 – поперечное сечение рассматриваемой вентсбойки №8, P_a – атмосферное давление, v_t – скорость поезда, I – границы станционного комплекса, II – перегонный тоннель

Модель турбулентности k - ε RNG описывается следующими уравнениями:

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

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

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

где (4) – (6) k – турбулентная кинетическая энергия, $\text{Дж}/\text{кг}$, ε – диссипация турбулентной кинетической энергии воздушного потока, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{с})$; μ – динамическая

вязкость, Па·с, M_t – турбулентная динамическая вязкость, Па·с; $\sigma_k=1$, $\sigma_{\varepsilon RNG}=0,7179$, $C_{\varepsilon 2RNG}=1,68$, $C_M=0,09$ – постоянные модели турбулентности; P_k , P_{kb} , $C_{\varepsilon 1RNG}$, $P_{\varepsilon b}$ – величины, определяемые из решений дополнительных уравнений [17].

Разбиение модели на конечно-элементную сетку произведено в препроцессоре ANSYS Meshing. Размерность сетки – 1950000 элементов при 1047000 узлах [18]. 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: стоянка на станции на протяжении 20 с, разгон при отходе от станции на протяжении 10 с, движение с постоянной скоростью по перегонному тоннелю, торможение перед станцией на протяжении 20 с. В моделировании принято 9 циклов прихода и ухода поезда на станцию и со станции (3 полных круга). За это время достигается устойчивый циклический характер воздухообмена (рис. 2).

Вычислительный эксперимент проведен для трех характерных скоростей поездов – 12 м/с, 20 м/с и 25 м/с, что для кольцевой модели соответствует частоте движения поездов соответственно 13,5 пар/ч, 17,5 пар/ч и 21,5 пар/ч.

Результаты

В процессе исследования получены минимальные, средние и максимальные значения проекции скорости воздуха на нормаль к поперечному сечению 18 вентиляционной сбойки и поле скоростей в её поперечном сечении в зависимости от скорости движения поездов. На рис. 2, 5, 6 приведены полученные значения для вентсбойки № 8. а рисунке 5 показано изменение среднего значения нормальной составляющей скорости воздуха в вентсбойке № 8 за один цикл при скорости движения поездов $v_t=12, 20, 25$ м/с. За начало цикла принято начало торможения поезда перед станцией, окончание цикла – начало следующего торможения этого же поезда на этой же станции. На рис. 3 приведены изополя и векторы проекции скорости воздуха на нормаль к поперечному сечению вентиляционной сбойки для характерных моментов движения поездов, на рис. 4 – линии тока через вентсбойку. Рис. 3 и 4 характеризующие пространственную структуру потока в вентсбойке. На рис. 7 приведено количество воздуха, перемещаемое за один проход поезда (от начала торможения перед станцией 3 до начала следующего торможения перед станцией 3) через вентсбойку №8.

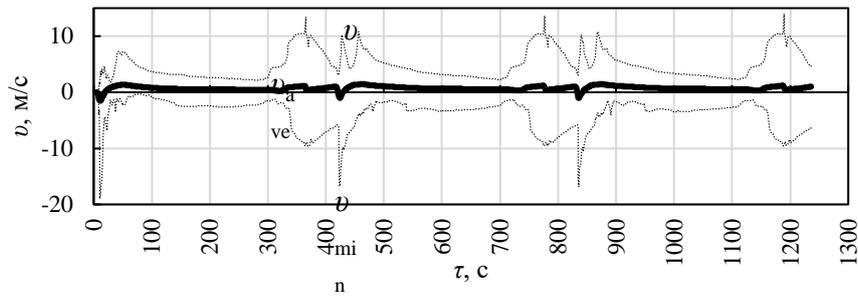


Рис. 2. Минимальное v_{\min} , среднее v_{ave} и максимальное v_{max} значения нормальной скорости воздуха в вентсбойке №6 для скорости движения поезда $v_t=20$ м/с

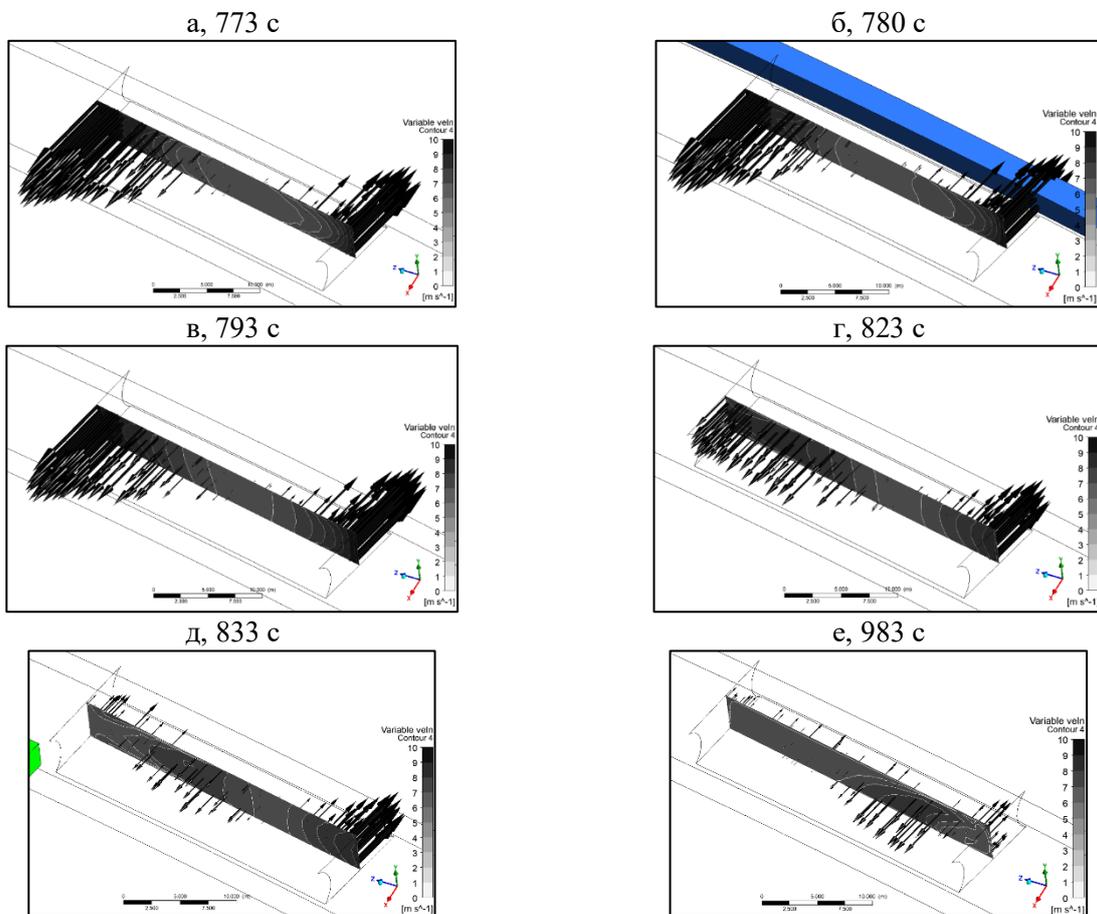


Рис. 3. Изополя и векторы нормальной составляющей скорости воздуха в поперечном сечении 18 вентсбойки №8, случай одновременного прихода поездов на станцию и ухода сос станции, скорость поездов $v_t=20$ м/с: *а* – начало торможения поезда перед станцией, *б* – поезд проезжает мимо вентсбойки №8, *в* – остановка поезда на станции и начало стоянки, *г* – конец стоянки поезда, начало разгона, *д* – конец разгона, начало движения с равномерной скоростью, *е* – движение поезда по перегонному тоннелю, на станции поезда отсутствуют; на рисунках цветом показаны поезда

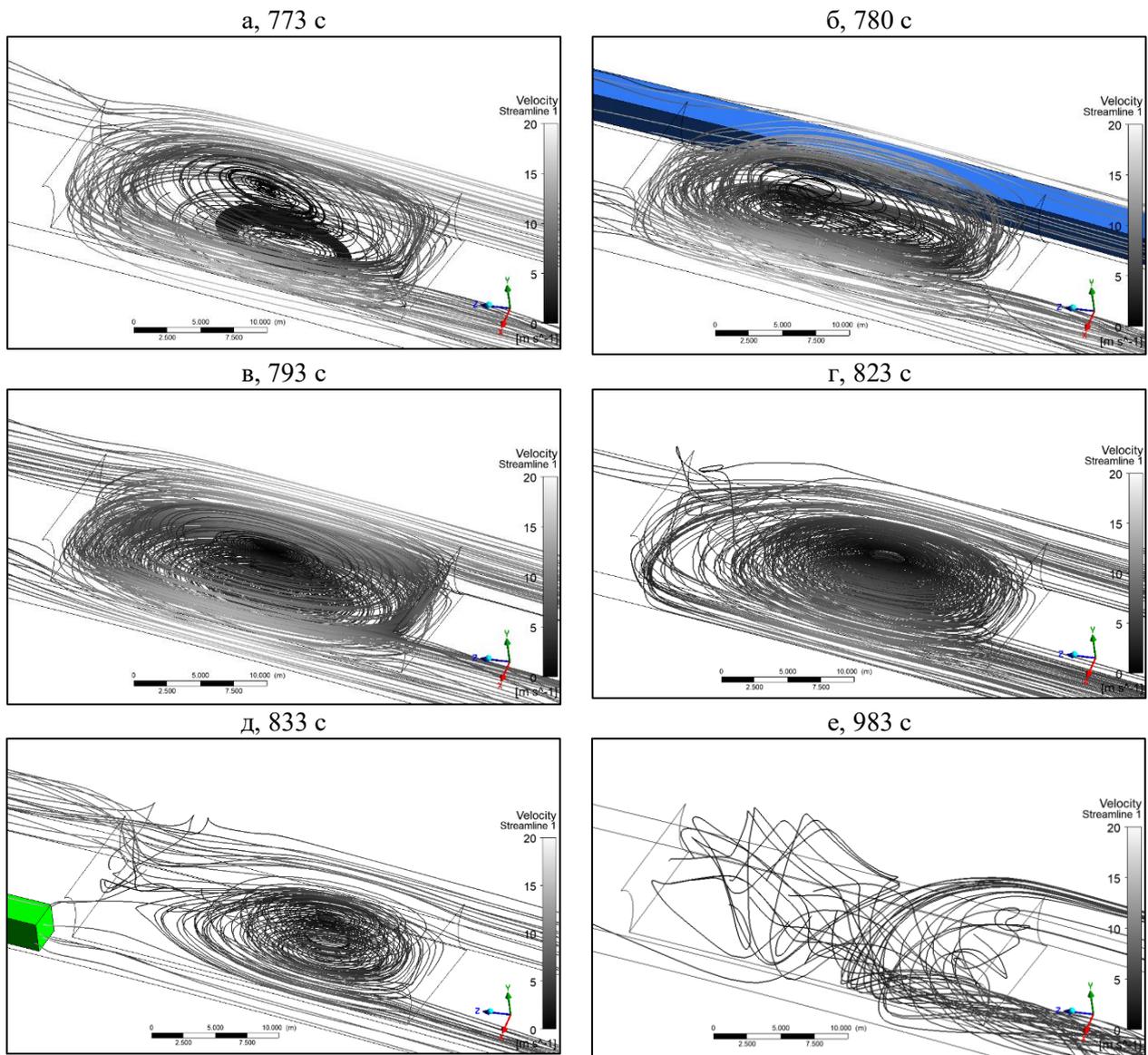


Рисунок 4 – линии тока в ветстбойке №8, случай одновременного прихода поездов на станцию и ухода со станции, скорость поездов $v_i=20$ м/с: *а* – начало торможения поезда перед станцией, *б* – поезд проезжает мимо ветстбойки №8, *в* – остановка поезда на станции и начало стоянки, *г* – конец стоянки поезда, начало разгона, *д* – конец разгона, начало движения с равномерной скоростью, *е* – движение поезда по перегонному тоннелю, на станции поезда отсутствуют; на рисунках цветом показаны поезда

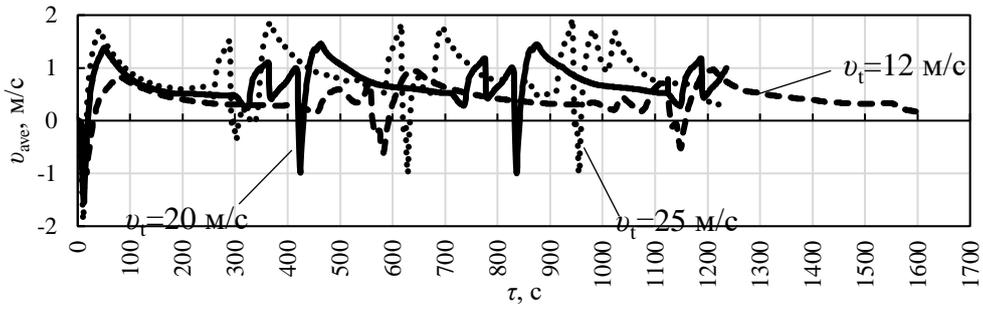


Рисунок 5 – среднее значение нормальной скорости воздуха при скорости движения поездов $v_t=12, 20, 25$ м/с в вентсбойке № 8

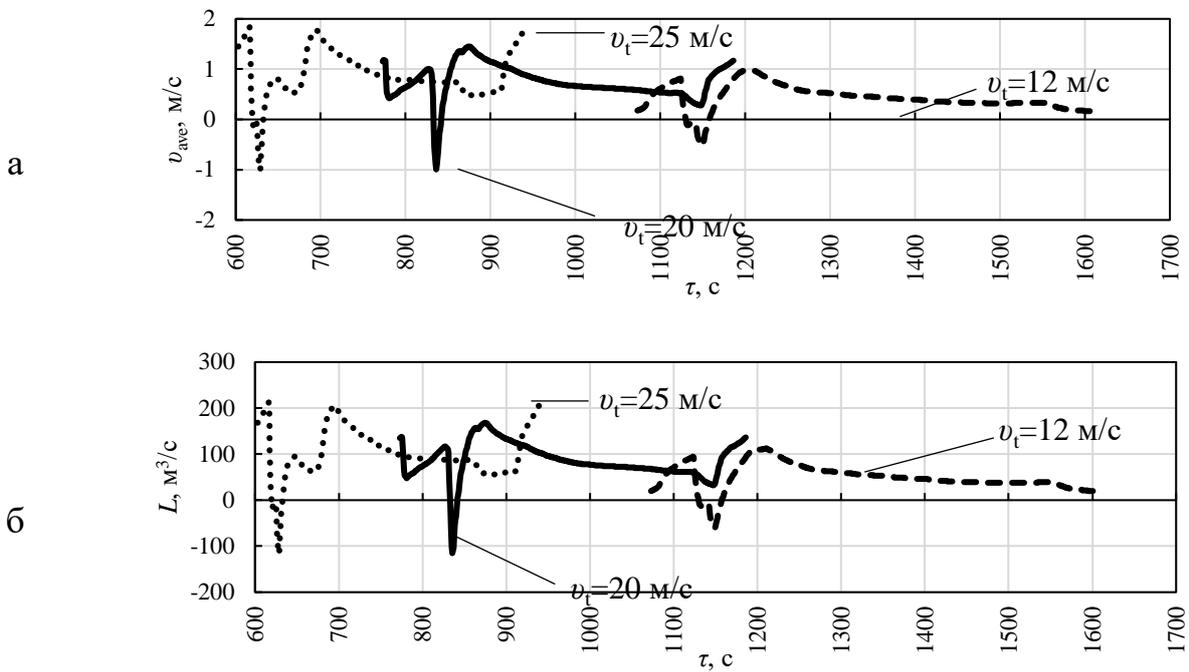


Рис. 6. Среднее значение нормальной скорости воздуха (а) и расхода воздуха (б) при скорости движения поездов $v_t=12, 20, 25$ м/с в вентсбойке № 8 за один проход по кольцу

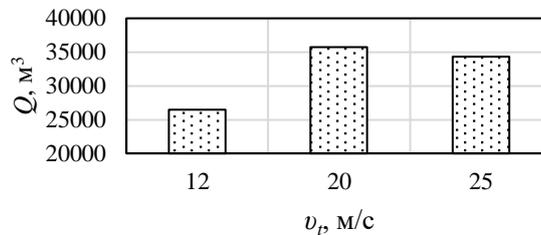


Рис. 7. Количество воздуха, прошедшее через вентсбойку № 8 за один проход поезда, при скорости движения поездов $v_t=12, 20, 25$ м/с

Обсуждение

Проведенный вычислительный эксперимент показал, что поле скоростей воздушных потоков в пристанционной вентсбойке имеет сложную пространственно-неоднородную структуру (рисунки 3, 4), а именно: наличие зон с разнонаправленным движением воздуха, значительный градиент изменения скорости по ширине вентсбойки с переходом значения нормальной составляющей скорости через «0» один или два раза, в зависимости от положения поезда относительно вентсбойки. Как видно из рисунка 4 *e*, упорядоченный проток воздуха через вентсбойку наблюдается, когда поезда на станции отсутствуют и движутся по участку с перегонными тоннелями, формируя, таким образом, главное циркуляционное кольцо [7]. Поэтому, наиболее эффективное пылеулавливание в вентсбойке будет происходить при движении поездов по тоннелям, т.е. при их отсутствии на станции, что занимает значительную часть цикла движения поездов. Также, следует отметить преимущественно незначительное изменение скорости по высоте вентсбойки (рис 3), что позволяет при выборе места размещения фильтрационного оборудования учитывать только профиль скорости воздуха по ширине вентсбойки, а сами фильтры размещать по всей её высоте. На рисунке 2 показаны минимальные, средние и максимальные значения нормальной составляющей скорости воздуха в вентсбойке № 8 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 -19,0 м/с до 13,4 м/с при среднем значении от -1,0 до 1,5 м/с. Наиболее значительные флуктуации потока по величине проекции вектора скорости воздуха на нормаль к поперечному сечению сбойки наблюдаются при движения поезда мимо рассматриваемой вентсбойки, что видно из рисунка 5. 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 м/с и 25 м/с. Это объясняется тем, что: *a*) скорость воздуха в вентсбойке при 20 м/с значительно выше чем при скорости движения поезда 12 м/с; *б*) скорость воздуха в вентсбойке при движении поезда с скоростью 25 м/с незначительно выше чем при движении с скоростью 20 м/с, но при этом время одного прохода поезда по расчетному участку меньше.

Заключение

На основании изложенного можно сделать вывод что:

– поле скоростей воздушных потоков в пристанционной вентсбойке имеет сложную пространственно-неоднородную структуру, заключающуюся в наличии зон с разнонаправленным движением воздуха по ширине и зон с локальным ускорением потока, но при этом с незначительным изменением скорости по высоте вентсбойки;

– значительная неоднородность поля скоростей воздушного потока в вентсбойке также характеризуется значительным превышением экстремальных значений скорости воздуха над средним значением, а именно, максимальные значения проекции векторов скорости на нормаль к оси вентсбойки достигают (в зависимости от направления) от -19,0 м/с до 13,4 м/с при их среднем значении от -1,0 до 1,5 м/с.

Благодарности

Работа выполнена в рамках научной темы FWNZ-2021-0004.

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 2.5.2623-10 Санитарные правила эксплуатации метрополитенов. Изменения и дополнения N 1 к СП 2.5.1337-03 [Текст] : утв. Пост. Главного государственного санитарного врача РФ от 30.04.2010 : дата введ. 08.06.2010. — М.: [б.и.], 2010. — 15 с.
3. 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
4. Сазонова А. М. Исследование пылевого фактора производственной среды метрополитена / А.М. Сазонова // Гигиена и охрана труда транспортной отрасли. — 2016. — с. 79-85
5. 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
6. 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
7. 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 // ФТПРПИ. — 2010. — №4. — с. 75-82
8. 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.
9. Красюк А.М. Обоснование технологической схемы вентиляции двухпутных тоннелей метрополитенов без перегонных вентиляционных камер / А.М. Красюк, И.В. Лугин, Е.Л. Алферова, Л.А. Кияница //ФТПРПИ. — 2016. — №4. — с. 117-130.
10. Красюк А.М. Исследование динамики воздушных потоков в метрополитене от возмущающего действия поездов / А.М. Красюк, И.В. Лугин // ФТПРПИ. — 2007. — №6. — с. 101-108.
11. Ying Wang. Unorganized ventilation in subway stations with Platform Screen Doors / Ying Wang, Xiaofeng Li // Building and Environment. — 2017. — №5088. — pp. 21.
12. Zhao Yang. An innovative environmental control system of subway / Zhao Yang, Xiangchao Su, Feng Ma, Longqing Yu, Hongna Wang // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. — 2015. — №147. — pp. 120-131.

13. 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.
14. 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.
15. 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 / Т.С. Ощепков, Л.А. Кияница, И.В. Лугин // *Интерэкспо ГеоСибирь*. – Новосибирск, 2020. – т.2. – с. 129-136.
16. Кияница Л.А. Исследование динамики давлений на поверхности вагонов поезда в двухпутном тоннеле метрополитена / Л.А. Кияница // *ГИАБ*. — 2016. — №11. — С. 400 – 407.
17. Ansys user's help viewer. Version 2019 R3
18. ANSYS. Customer Training Material. Introduction to ANSYS Meshing
19. Батурин О.В. Расчет течений жидкостей и газов с помощью универсального программного комплекса Fluent. Учеб. Пособие / О.В. Батурин, Н.В. Батурин, В.Н. Матвеев — Самара: Изд-во Самар.гос.аэрокосм.ун-та, 2009. — 151 с.: ил.
20. Федорова Н.Н., Вальгер С.А., Данилов М.Н., Захарова Ю.В. Основы работы в ANSYS 17. — М.: ДМК Пресс, 2017. — 210 с.: ил.

© Л. А. Кияница, И. В. Лугин, А. М. Красюк, 2021