

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ ВОЗДУХА В ТОННЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЯХ ЛИНИИ МЕТРОПОЛИТЕНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОЛЬЦЕВЫХ МОДЕЛЕЙ КАК СПОСОБА ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ

Тимофей Сергеевич Ощепков

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008, Россия, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, магистрант, тел. (952)921-27-78, e-mail: timofeyoshchepkov@gmail.com

Лаврентий Александрович Кияница

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, младший научный сотрудник лаборатории рудничной аэродинамики, тел. (383)205-30-30, доб. 179, e-mail: Lavrentij.Kijanitz@yandex.ru

Иван Владимирович Лугин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории рудничной аэродинамики, тел. (383)205-30-30, доб. 179, e-mail: ivlugin@misd.ru

Подземные сооружения метрополитена являются местом массового пребывания людей, по этой причине к ним предъявляются высокие требования по поддержанию нормативных параметров микроклимата на станциях и в тоннелях, в том числе по содержанию взвешенной пыли в воздухе. Для поддержания концентрации пыли в нормативных пределах, предлагается использовать воздушные фильтры, установленные в пристанционных вентиляционных сбояках в потоке воздуха от поршневого эффекта поездов. Для исследования поршневого эффекта вычислительными методами аэрогазодинамики, предложен способ топологической декомпозиции линии метрополитена, а именно переход от полной линейной модели к замкнутой кольцевой выделением нескольких перегонов и замыкание их в кольцо, что позволяет уменьшить размер дискретной модели расчетного участка с сохранением учета влияния соседних перегонов и станций и точности расчета. В результате численного эксперимента определены параметры нестационарного воздухораспределения от поршневого эффекта поездов и структура воздушного потока в местах установки фильтров для дальнейшего исследования их геометрических, конструктивных и эксплуатационных параметров.

Ключевые слова: метрополитен, кольцевые модели, поршневой эффект, воздухораспределение, декомпозиция.

TO THE PROBLEM OF DETERMINING AIR VELOCITY FIELD IN TUNNEL STRUCTURES OF A SUBWAY LINE USING CIRCULAR MODELS AS A METHOD OF TOPOLOGICAL DECOMPOSITION

Timofey S. Oshchepkov

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), 113, Leningradskaya St., Novosibirsk, 630008, Russia, Graduate, phone: (952)921-27-78, e-mail: timofeyoshchepkov@gmail.com

Lavrenty A. Kiyanitsa

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Junior Researcher, Laboratory of Mine Aerodynamics, phone: (383)205-30-30, extension 179, e-mail: Lavrentij.Kijanitz@yandex.ru

Ivan V. Lugin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Associate Professor, Senior Researcher, phone: (383)205-30-30, extension 179, e-mail: ivlugin@misd.ru

Underground subway structures represent crowded public areas; therefore, they are subject to high requirements for maintaining the standard microclimate parameters at stations and in tunnels, including the content of suspended dust in the air. To maintain dust concentration within specifications, it is proposed to use air filters installed in station ventilation connections in the stream of air from the piston effect of trains. To study the piston effect by aerogasdynamic computational methods, a method is proposed for the topological decomposition of a subway line – transition from a complete linear model to a closed circular model by isolating several lines and closing them into a circle, which allows reducing the size of discrete model of the design section, while maintaining the influence of neighboring lines and stations as well as calculation accuracy. As a result of a numerical 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 for further study of their geometric, structural and operational parameters.

Key words: subway, circular models, piston effect, air distribution, decomposition.

Введение

В ходе эксплуатации метрополитена возникает необходимость в решении задачи по поддержанию параметров внутреннего микроклимата в рамках действующих нормативных требований. Согласно санитарных и нормативных требований [1, 2], концентрацию взвешенной пыли в воздухе пассажирских помещений и тоннелей метрополитенов необходимо поддерживать не выше допустимых уровней ПДК. Ряд проведенных исследований [3, 4] указывает на то, что концентрация пыли в тоннельном воздухе значительно превышает допустимые показатели. Так, согласно [3] концентрация пыли на рабочих местах персонала метрополитена превышает норму в 1,3-3,4 раза. Мелкодисперсная пыль, содержащаяся в воздухе в высоких концентрациях, может провоцировать болезни органов дыхания, в частности респираторные заболевания [5]. Кроме этого оседающая на внутренних поверхностях отделки тоннелей и станций метрополитенов пыль, является наиболее подходящей средой для размножения патогенных бактерий, что дополнительно повышает степень биологической обсемененности в метрополитенах [6]. Исходя из этого возникает необходимость в дополнительной фильтрации и обеспыливании тоннельного воздуха. Авторами настоящей статьи предлагается устанавливать устройства для очистки воздуха в пристанционных вентиляционных сбойках, так как значительная часть тоннельного воздуха проходит именно через вентсбойки [7,8], образуя циркуляционное кольцо, причем расход воздуха, вовлекаемый в циркуляцию, увели-

чивается с повышением количества встреч поездов. Для определения геометрических, конструктивных и эксплуатационных параметров фильтрующих устройств необходимо определить закономерности изменения скорости движения тоннельного воздуха, инициируемого поршневым эффектом от движения поездов, через вентиляционные сбойки в зависимости от положения поездов в тоннеле. Для повышения точности расчетов и учета взаимного влияния соседних участков линии метрополитена предлагается использовать для топологической декомпозиции кольцевые модели.

Целью данной работы является определение поля скоростей тоннельного воздуха в пристанционных вентиляционных сбойках для дальнейшей разработки мероприятий по очистке тоннельного воздуха от взвешенной пыли.

Методы и материалы

Для получения наиболее достоверных результатов при исследовании поршневого эффекта вычислительными методами аэрогазодинамики в протяженных транспортных линиях при выборе расчетного участка необходимо учесть влияние прилегающих участков линий, которые не входят в расчетную модель. Например, при моделировании воздухообмена на участке «станция-перегонный тоннель-станция» необходимо учитывать влияние от четырех до восьми соседних станций. В противном случае, если задавать на границах расчетного участка граничное условие «атмосферное давление», т. е. выход в атмосферу, то величина воздухообмена на участке будет необоснованно завышена, так как аэродинамическое сопротивление всей линии метрополитена не учитывается. В работе [9] проведен анализ способов, реализуемых в ANSYS и применимых для расчета методом конечных объемов, позволяющих учесть аэродинамическое сопротивление всей сети метрополитена при моделировании отдельно взятого расчетного участка линии. Так, по итогам проведенного анализа для моделирования аэродинамических процессов в сооружениях метрополитена было обосновано использование кольцевой модели линии метрополитена, как способ топологической декомпозиции. Под декомпозицией понимается разделение решения одной задачи на несколько более простых, т. е. переход от полной линейной модели к замкнутой кольцевой. В кольцевой модели выделяется несколько перегонов с последующим замыкание их границ, что позволяет уменьшить размер дискретной модели расчетного участка с сохранением аэродинамического влияния соседних перегонов и станций без потерь точности расчета. Данный способ моделирования позволяет избежать следующих недостатков, характерных для других способов декомпозиции: а – нарушение структуры потока вблизи порталов моделируемого участка тоннеля; б – увеличение размера конечно-элементной сетки модели и продолжительности расчета; в – не происходит сглаживание колебаний скорости у порталов исследуемого участка, вызванного волнами статического давления при движении поездов. Для приближения геометрических характеристик моделируемого тоннеля к реальным, т. е. снижения их кривизны, в расчетную модель следует вводить не

менее трех станций и перегонов с длиной до 1000 м. В этом случае расчетный участок является элементом сопротивления не учитываемой части подземных сооружений метрополитена.

К расчету принят участок метрополитена, включающий в себя три типовые станции островного типа и три перегона с однопутными туннелями. Геометрические характеристики расчетной модели представлены на рис. 1. 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 секунд. Для определения поля скоростей воздуха в расчетной модели применен программный комплекс ANSYS Fluent.

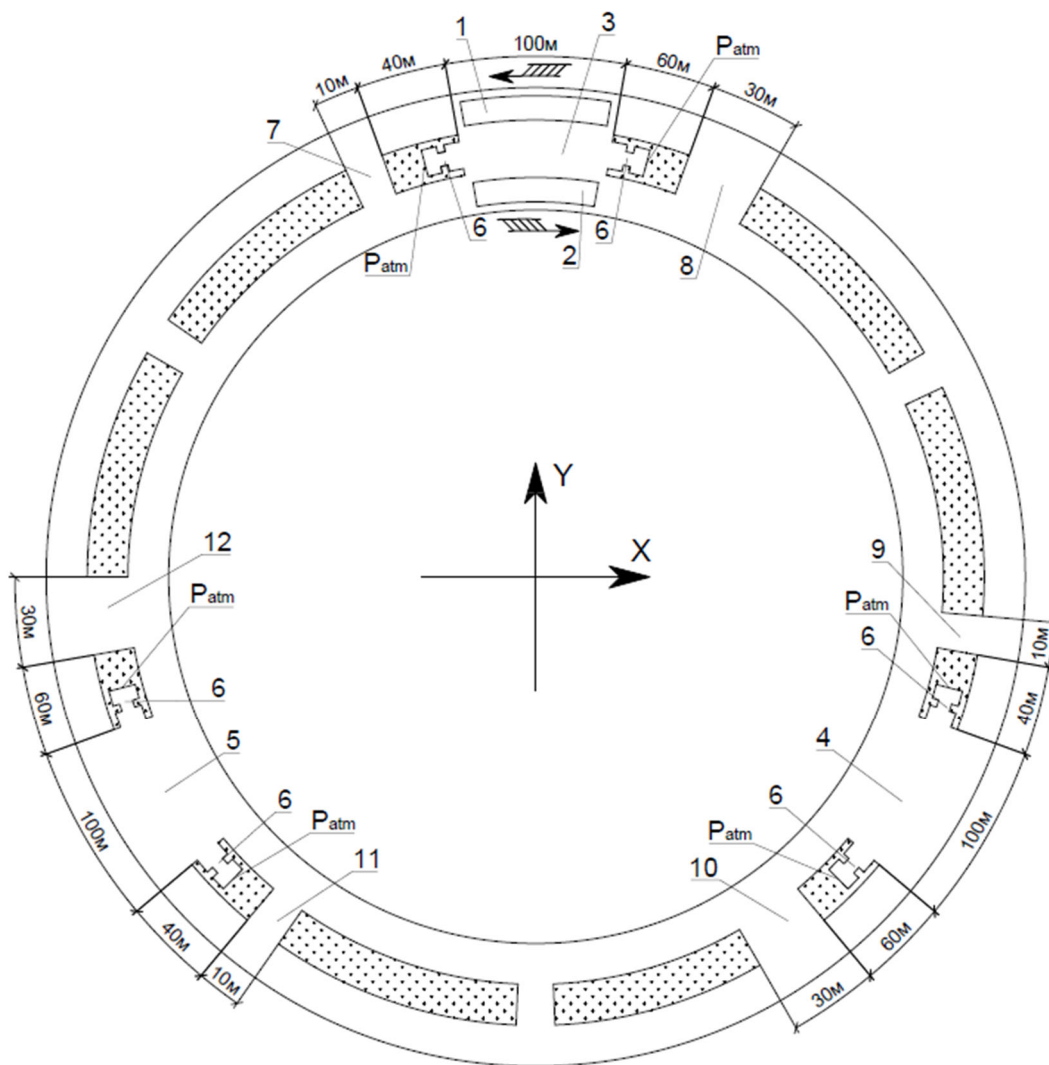


Рис. 1. Геометрические характеристики расчетной модели:

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, Patm – атмосферное давление

В основу решателя ANSYS Fluent положен метод конечных объемов (МКО) [10], при котором расчетная модель разбивается на множество элементов. В этом случае для каждого элемента описывается система законов сохранения массы, импульса и энергии в интегральной форме, преобразуемая к системе алгебраических уравнений относительно искомых величин в центрах расчетных ячеек. Конечным результатом в данной задаче является определение поля скоростей в расчетной модели, путем численного решения системы уравнений, состоящей из уравнений Навье-Стокса, уравнения Пуассона для давлений и k - ϵ Realizable модели турбулентности. Для уменьшения продолжительности времени вычислений данная задача решалась в плоской постановке.

В препроцессоре ANSYS Meshing произведено разбиение модели на конечно-элементную сетку. Количество элементов составило 115428 элемента. Качество построенной расчетной конечно-элементной сетки определялось по двум параметрам: ортогональное качество и степень асимметрии, значения которых находятся в рекомендуемых пределах согласно [11]. В рамках принятой k - ϵ Realizable модели турбулентности величина безразмерного расстояния до стенки модели y^+ должна лежать в пределах от 30 до 300. Исходя из этого требования, по методике [12] определена величина пристеночных ячеек, которая составляет 0,005 м. Решение задачи производилось в нестационарной постановке. Шаг по времени выбирался исходя из равенства числа Куранта единице.

$$Ku = \frac{\Delta\tau \times V_n}{s} = 1, \quad (1)$$

где s – величина ячейки вдоль движения поезда; $\Delta\tau$ – шаг по времени, с; V_n – скорость поезда, м/с.

Шаг по времени равен 0,05 с. Общее время движения поезда составило 887 с (6 циклов прихода и ухода поезда на станцию и со станции).

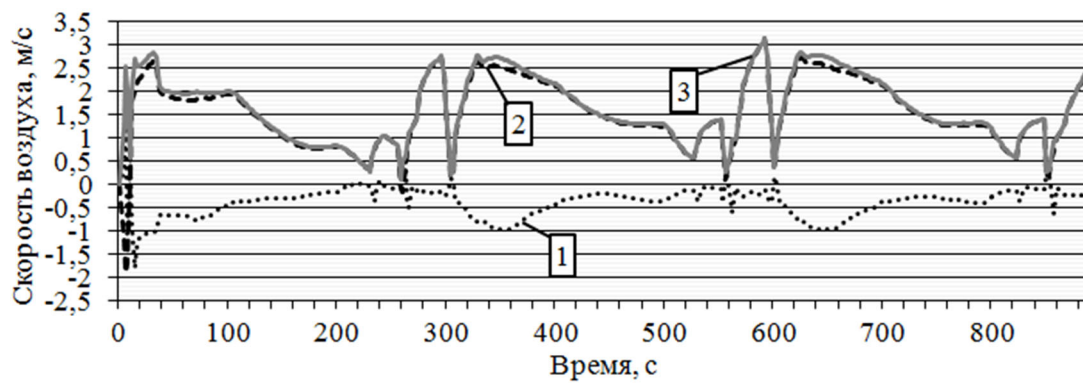
Результаты

1. В процессе решения получены закономерности изменения скорости тоннельного воздуха и ее составляющих по координатам X, Y в пристанционных вентиляционных сбойках. Результаты показаны на рис. 2.

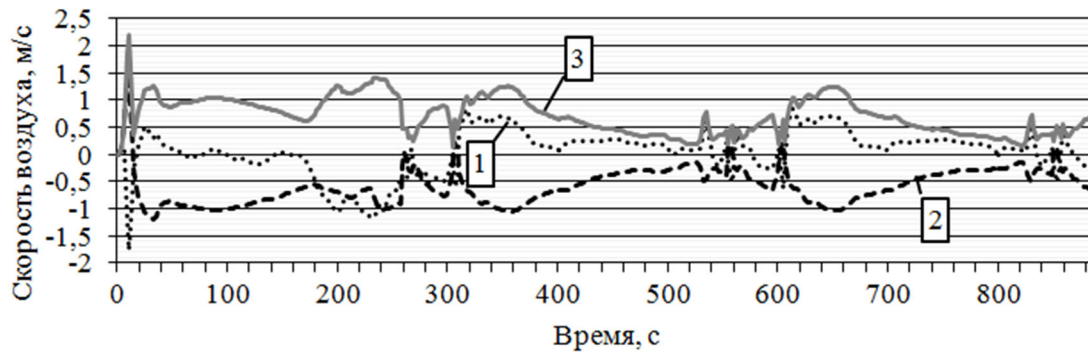
2. Определены векторы и поле скоростей потока воздуха в вентиляционной сбойке. Результаты показаны на рис. 3.

Обсуждение

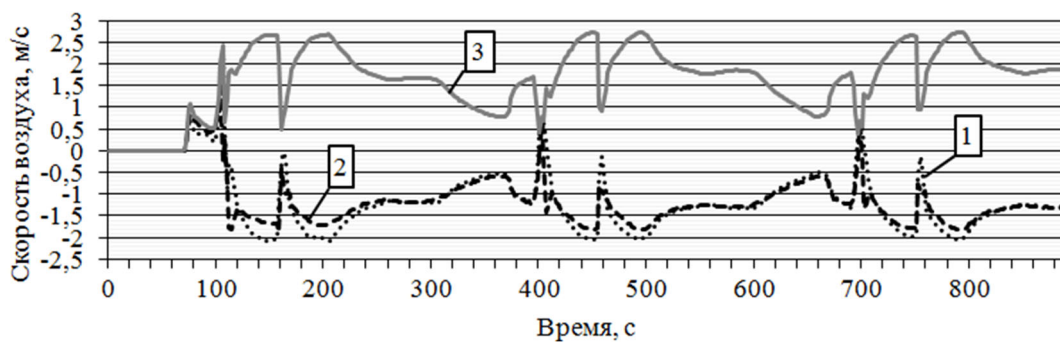
Направление скорости воздуха в вентиляционных сбойках имеет разнонаправленный характер и зависит от положения поезда в тоннеле относительно вентсбойки (рис. 3, a – z), что следует из полученных закономерностей изменения скоростей воздуха. В момент приближения поезда к вентсбойке, происходит выталкивание воздуха через сечение вентсбойки в соседний тоннель, на графике скорости этот момент характеризуется резким скачком.



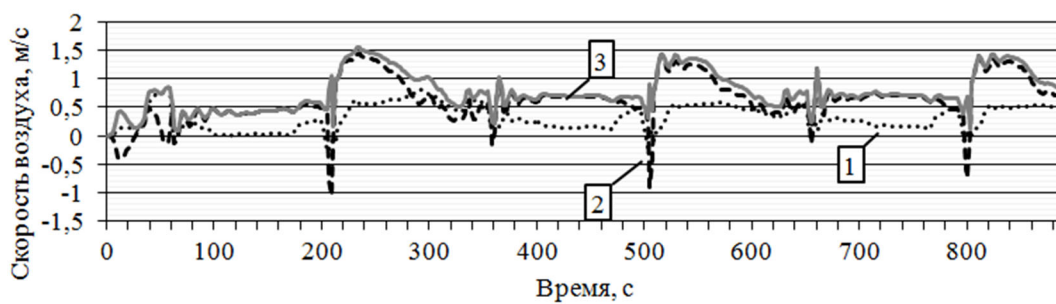
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Скорости воздуха в вентиляционных сбойках:

а) скорость воздуха в вентсбойке № 1.1; б) скорость воздуха в вентсбойке № 1.2; в) скорость воздуха в вентсбойке № 3.1; г) скорость воздуха в вентсбойке № 3.2; по оси абсцисс – время, с; по оси ординат – скорость воздуха, м/с; 1 – проекция вектора скорости на ось X; 2 – проекция вектора скорости на ось Y; 3 – скорость воздуха в вентсбойке

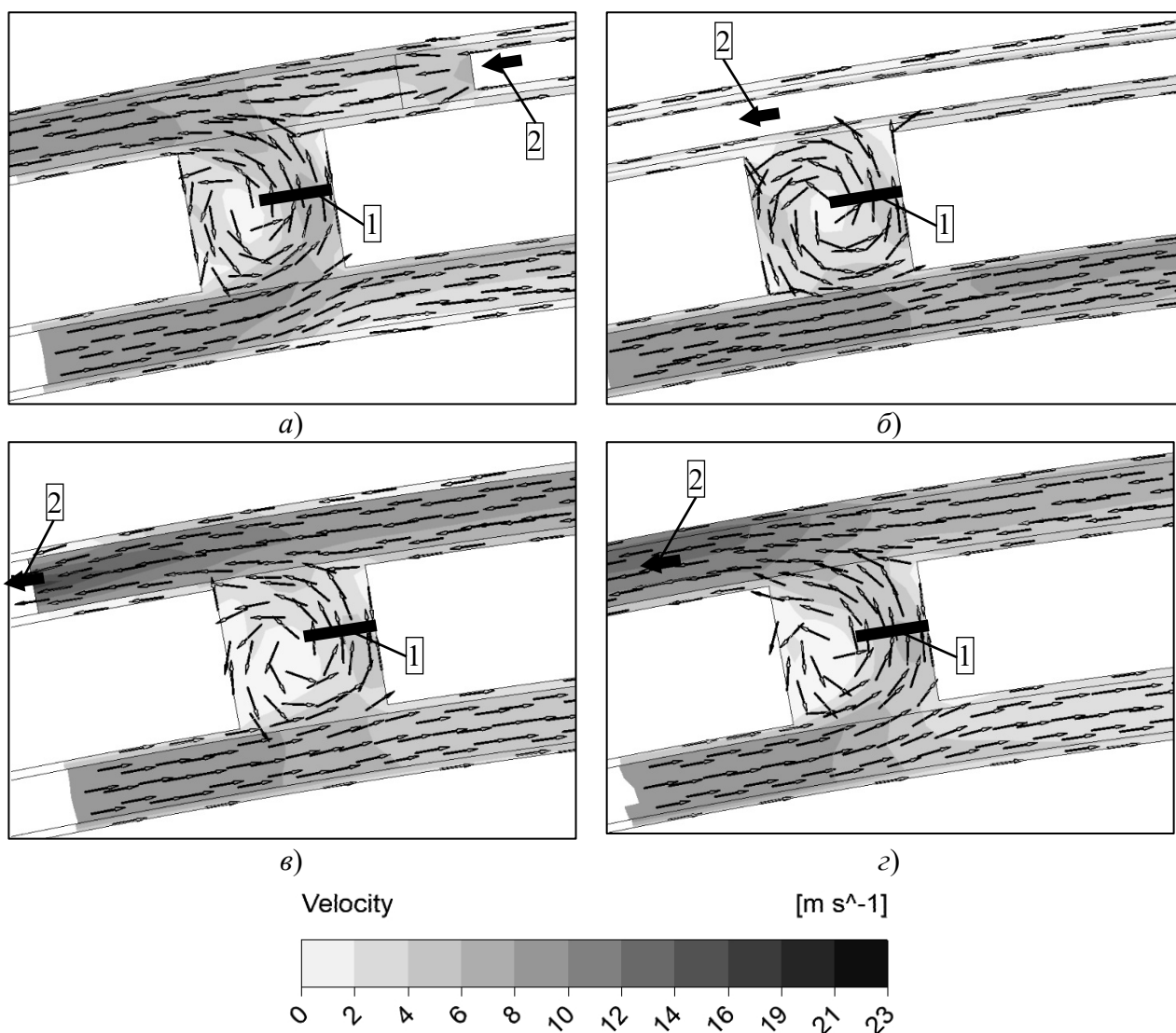


Рис. 3. Векторы и поле скоростей при прохождении поезда
вентиляционной сбойки № 1.1:

стрелками указано направление движения потока воздуха; 1 – место размещения
фильтрационного оборудования; 2 – направление движения поезда

В момент, когда поезд проходит вентсбойку происходит опрокидывание потока воздуха, и воздух поступает через вентсбойку из соседнего тоннеля, что объясняется разрежением за последним вагоном поезда. Однако из рис. 2, а–г видно, что в вентиляционных сбойках резкое изменение направления движения воздуха происходит только в непродолжительный момент времени, когда поезд проходит мимо вентсбойки, длительностью ~10 с. Все остальное время в вентсбойке наблюдается устойчивый по направлению поток воздуха – изменяется только абсолютная величина скорости воздуха. Исходя из этого условия фильтрационное оборудование, предназначенное для очистки тоннельного воздуха, установленное в вентсбойке, должно быть устойчивым к резкому непродолжительному изменению направления движения воздуха. Этого можно до-

стигнуть при помощи закрытия жалюзийных решеток перед фильтром на время прохождения поезда мимо вентсбойки или созданием направляющих потока определенной конфигурации. Само же фильтрационное оборудование следует размещать в зоне действия прямого потока воздуха для эффективного улавливания взвешенной пыли, данное место указано на рис. 3, а–г.

Заключение

1. Обоснован новый способ топологической декомпозиции, заключающийся в применении кольцевых моделей, для исследования поршневого эффекта вычислительными методами аэрогазодинамики в подземных сооружениях линий метрополитена. В кольцевую модель следует включать не менее трех станций и трех перегонов длиной до 1000 м., что позволяет снизить кривизну моделируемого участка и приблизить его геометрические характеристики к реальным. Использование данной модели позволяет учесть аэродинамическое сопротивление линии метрополитена, значительно уменьшить размер расчетного участка линии метрополитена без потерь точности расчета, что в свою очередь позволяет сократить объем вычислительного эксперимента.

2. Определены закономерности изменения скорости тоннельного воздуха в пристанционных вентиляционных сбойках, направление воздушного потока и поля скоростей, что позволяет обосновать требуемые рабочие параметры фильтрационных установок тоннельного воздуха для дальнейшего подбора или их разработки, а также определено место расположения этого оборудования.

3. Определено, что максимальная скорость воздуха в вентсбойке, направленная вдоль нее, составляет 3,1 м/с.

Благодарности

Данная статья написана по результатам исследований, приведенных в рамках проекта ФНИ, номер гос. регистрации АААА-А17-117091320027-5.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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. : [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 : утв. Пост. Главного государственного санитарного врача РФ от 30.04.2010 : дата введ. 08.06.2010. – М.: [б.и.], 2010. – 15 с.

3. 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 // Гигиена и охрана труда транспортной отрасли. – 2016. – с. 79-85.

5. 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. 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.

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, P. 21–28.

9. Кияница Л. А. Исследование динамики давлений на поверхности вагонов поезда в двухпутном тоннеле метрополитена // ГИАБ. – 2016. – № 11. – С. 400–407.

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

11. ANSYS. Customer Training Material. Introduction to ANSYS Meshing.

12. Расчет течений жидкостей и газов с помощью универсального программного комплекса Fluent : учеб. пособие / О.В. Батулин, Н.В. Батулин, В.Н. Матвеев. – Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2009. – 151 с.

© Т. С. Ощепков, Л. А. Кияница, И. В. Лугин, 2020