

ПОДДЕРЖАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МИКРОКЛИМАТА НА ТУПИКОВОЙ СТАНЦИИ ЛИНИИ МЕТРОПОЛИТЕНА

Александр Михайлович Красюк

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, тел. (383)205-30-30, доп. 182, e-mail: krasuk@cn.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, тел. (383)205-30-30, доп. 179, e-mail: ivlugin@misd.ru

Приведены результаты натуральных исследований скорости воздушных потоков, инициированных поршневым действием поездов на тупиковой станции «Площадь Гарина-Михайловского» Новосибирского метрополитена. Определены фактические объемы холодного наружного воздуха, поступающего на станцию, а также зависимости скорости воздушных потоков от скорости движения поездов. Показано, что при температуре наружного воздуха ниже $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ эксплуатируемые воздушно-тепловые завесы не обеспечивают подогрева поступающего на станцию холодного воздуха до нормативной температуры.

Приведены результаты вычислительных экспериментов на математической модели воздухораспределения, выявлены расчетные зависимости скоростей движения воздушных потоков через вестибюли станции от скорости движения поездов по перегону «Сибирская» – «Площадь Гарина-Михайловского». Показано, что наиболее эффективным путем уменьшения интенсивности поступления на станцию холодного атмосферного воздуха является изменение скоростных режимов прибывающих и убывающих поездов. Определены значения требуемой тепловой мощности воздушно-тепловых завес в вестибюлях станции в зависимости от температуры атмосферного воздуха и скоростного режима движения поездов. Рекомендован вариант скоростного режима, когда поезд прибывает на станцию со скоростью 60 км/ч, а убывает со скоростью 30 км/ч. При этом средняя скорость поступающего в вестибюль холодного наружного воздуха снижается в 2 раза по сравнению с той, которая есть при существующем скоростном графике поездов. В этом случае мощности эксплуатируемых тепловых завес будет достаточно для поддержания нормативной температуры в вестибюлях станции при температуре атмосферного воздуха выше $-27\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ключевые слова: метрополитен, тоннельная вентиляция, поршневой эффект, поршневое действие поездов, температура воздуха.

KEEPING OF MICROCLIMATE PARAMETERS AT TERMINAL STATION OF SUBWAY LINE

Aleksander M. Krasnyuk

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, D. Sc., Professor, Chief Researcher, phone: (383)205-30-30, extension 182, e-mail: krasuk@cn.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)205-30-300, extension 179, e-mail: ivlugin@misd.ru

In the work results of field studies of speed of air flows initiated by piston effect of trains on terminal station Ploshad Garina-Mikhaylovskogo of Novosibirsk Subway are represented. Actual volumes of cold outside air inflowing into the station and dependences of air flow speeds on movement speed of trains are determined. It is shown when temperature of outside air is below than -10° , warm air curtains in operation do not provide heating up inflowing into the station cold air to standard temperature.

Results of calculating experiments at math model of air distribution are represented, calculated dependences of speed of air flows movement through halls of the station on train movement speed at block "Sibirskaya - Ploshad Garina-Mikhaylovskogo" are discovered. It is shown that the most effective way of reduction of intensity of cold outside air inflowing into the station is change of speed modes of arriving and departing trains. Values of required heat power of warm air curtains at station halls in dependence on outside air temperature and speed mode of trains are determined. Variant of speed mode when train arrives to the station with the speed 60 km/h and departures with the speed 30 km/h is recommended. In this case average rate of inflowing to the hall air is reduced into 2 times compared with air rate of actual train movement schedule. In the context of this variant, power of operated warm air curtains is enough for keeping standard temperature at the halls of the stations when outside air temperature is above -27°C .

Key words: subway, tunnel ventilation, piston effect, piston effects of trains, air temperature.

Введение

В метрополитене всегда есть конечные станции на линии, так называемые – тупиковые станции. Метрополитены постоянно развиваются, и конечные тупиковые станции становится промежуточными, а станции, построенные в продолжение линии – тупиковыми. Воздухораспределение на таких станциях в большей степени зависит от поршневого действия поездов, чем на промежуточных станциях. Особенно сильно это проявляется в больших объемах атмосферного воздуха, поступающего на станцию через пассажирские пути вследствие поршневого действия убывающего поезда [1]. В метрополитенах мелкого заложения, эксплуатирующийся в суровом климате, к которым относится Новосибирский метрополитен, в холодный период года это приводит к переохлаждению вестибюлей станций за счет атмосферного воздуха, имеющего отрицательную температуру [2]. Поэтому в холодный период года затраты на подогрев атмосферного воздуха, поступающего на тупиковую станцию, до нормативной температуры [3–5], значительно выше, чем аналогичные затраты на промежуточных станциях.

Исследованиям аэродинамики транспортных тоннелей и тоннелей метрополитенов посвящено значительное количество научных работ. В них анализируются как штатные режимы проветривания, так и аварийные [6–8]. Исследования таких объектов транспортной инфраструктуры в натуральных условиях сопряжено с большими трудностями [9, 10], поэтому большая часть научных работ содержит результаты физического масштабного моделирования [6, 11], либо вычислительных экспериментов [12, 13]. Для изучения аварийных режимов, связанных с распространением по тоннелю высокотемпературных продуктов горения, используется объемное моделирование с применением метода конеч-

ных объемов с реализацией в программных комплексах наподобие ANSYS [14]. Эти же методы применяются при исследовании штатных режимов и микроклимата в подземных сооружениях, при необходимости получения поля распределенных параметров в объеме исследуемого тоннеля. Но такие исследования весьма требовательны к вычислительным ресурсам и затратны по времени. С этим борются, применяя, например, мультимасштабный подход [15]. Поэтому математическое моделирование воздухораспределения на большом участке линии метрополитена с двумя и более станциями методом конечных объемов нерационально.

В таких случаях больше подходят сетевые методы вычисления воздухораспределения, которые относятся к методам с сосредоточенными параметрами и имеют существенно большее быстроедействие. В настоящей работе вычислительные эксперименты по исследованию поршневого действия поездов [16] проведены с использованием квазидинамической модели действия поезда на модели статического воздухораспределения [17, 18].

Методы и материалы

Для определения путей снижения количества холодного атмосферного воздуха, поступающего на станцию вследствие поршневого действия поездов, проведены экспериментальные исследования на тупиковой станции "Площадь Гарина-Михайловского" Новосибирского метрополитена [19]. Измерения проводились в вечернее время (с 20:00 до 23:30) при малой интенсивности движения поездов для снижения их взаимного влияния на воздухораспределение исследуемой станции. Температура атмосферного воздуха вблизи станции составляла $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, ветер $3,7\text{ м/с}$, давление 739 мм.рт.ст. , относительная влажность 78% . Режим работы тоннельных вентиляторов: они выключены, шиберы закрыты.

Измерения скорости воздушных потоков проводились термоанемометрами ТТМ-2-02-1, класс точности $0,25$, диапазон измерения скорости от $0,1$ до 30 м/с , температуры от -20 до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Результаты измерений записывались в память ноутбука в режиме реального времени. Запись с термоанемометров производилась с интервалом 1 измерение в секунду. Измерительные комплексы в замерных пунктах были синхронизированы между собой по времени. Время прибытия и ухода поездов на станцию «Площадь Гарина-Михайловского» фиксировалось по синхронизированным с измерительной аппаратурой часам.

Результаты

В работе [20] представлены результаты измерения и математического моделирования скорости воздушного потока. Определено количество воздуха, поступающего на станцию, как теплого из тоннеля, так и холодного атмосферного с поверхности через пешеходные пути.

Анализ результатов обработки экспериментальных данных показывает, что количество наружного воздуха, поступающего в вестибюли станции при уходе поезда больше, чем количество воздуха, поступающего на станцию из тоннеля при приходе поезда. Определено, что в среднем количество воздуха, поступающего с поверхности на станцию «Площадь Гарина-Михайловского» вследствие поршневого действия одного убывающего поезда за один цикл, составляет 8624 м^3 , а количество воздуха, вытесняемого на поверхность прибывающим поездом, составляет 977 м^3 . В среднем, отношение объемов вытесняемого со станции теплого внутреннего воздуха к поступающему холодному наружному воздуху составляет 0,11. Для вестибюля №1, эта величина составляет 0,01, для вестибюля № 2 - 0,49.

Поскольку отношение количества внутреннего теплого к наружному воздуху существенно меньше единицы, в холодное время года вестибюли станции постепенно охлаждаются до температур ниже нормируемой $+10 \text{ }^\circ\text{C}$ и его необходимо подогревать.

Для моделирования воздухораспределения на станции были проведены измерения эксплуатационной скорости движения поездов на перегоне «Сибирская» – «Площадь Гарина-Михайловского». Показания скорости снимались с цифрового спидометра в кабине машиниста поезда. Результаты измерений приведены на рис. 1.

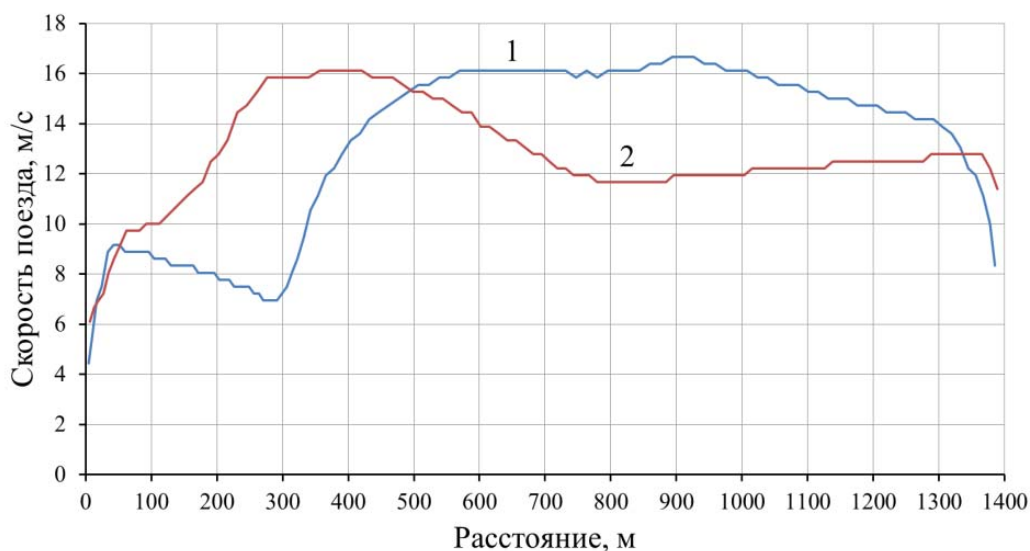


Рис. 1. Скорость движения поезда:

1 – движение поезда по первому пути (от станции "Сибирская" к станции "Площадь Гарина-Михайловского"); 2 – движение поезда по второму пути (от станции "Площадь Гарина-Михайловского" к станции "Сибирская")

В результате анализа графиков скорости подвижного состава, были выделены четыре характерных участка как для прибывающего на станцию, так и для уходящего поездов (рис. 2). Скорости поездов на одинаковых участках пу-

тей № 1 и № 2 различаются. В последующих вычислительных экспериментах было принято допущение, что на протяжении каждого из этих участков (рис. 2), поезд движется с постоянной скоростью.

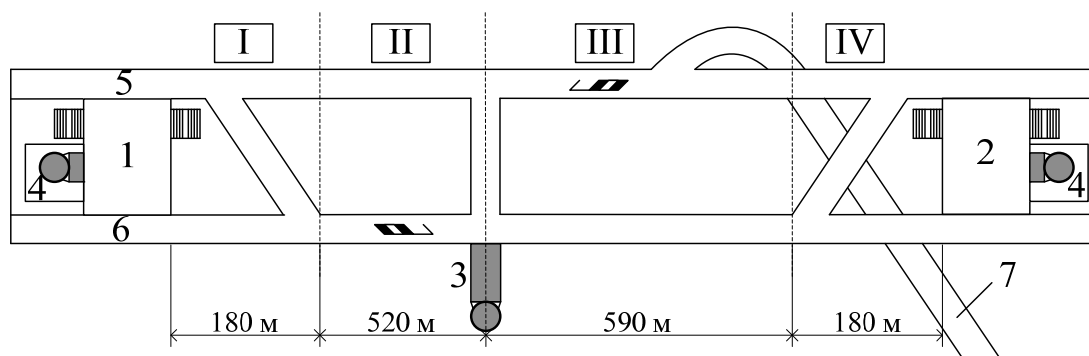


Рис. 2. Схема перегона между станциями, с указанием скорости движения поезда на участках:

1 – станция "Площадь Гарина-Михайловского"; 2 – станция "Сибирская"; 3 – перегонная вентиляционная камера; 4 – станционная вентиляционная камера; 5 – путь №1; 6 – путь №2; 7 – соединительная ветка.

С учетом принятых допущений проведено математическое моделирование воздухораспределения на станции «Площадь Гарина-Михайловского» путем проведения вычислительного эксперимента. На основании анализа результатов эксперимента была скорректирована сетевая математическая модель поршневого действия поезда на промежуточной станции, описанная в [17], так чтобы она соответствовала воздухораспределению на тупиковой станции. Анализ результатов моделирования показал удовлетворительную сходимость с результатами натурного эксперимента. Таким образом, принятую математическую модель можно считать адекватной фактическому воздухораспределению. С ее использованием, проведены исследования влияния следующих факторов на количество холодного воздуха, поступающего с поверхности в вестибюли станции вследствие поршневого действия поездов:

- 1) скорость прибывающих и уходящих поездов;
- 2) установка дополнительного ряда дверей в подуличном переходе;
- 3) открытие шибера и вентиляционного клапана (ВК) в станционной венткамере;
- 4) комбинация факторов 2 и 3;
- 5) комбинация факторов 1, 2 и 3;

Моделирование воздухораспределения на станции, инициированное поршневым действием поездов, проводилось для значений скорости поезда 20, 30, 40, 50 и 60 км/ч. Принято допущение, что на всем перегоне поезд движется с постоянной скоростью, за исключением участков разгона и торможения. Таким образом, время нахождения поезда на перегоне, а, следовательно, и время цикла, в каждом варианте было разным. Минимальное время цикла, включаю-

щее движение по перегону и стоянку поезда на станциях, при скорости 60 км/ч составляло 240 с, максимальное при скорости 20 км/ч – 560 с. Фактическое время цикла, измеренное в период проведения натуральных экспериментов, составляет 320 с. Этот вариант принят в качестве базового.

В результате серий вычислительных экспериментов получены зависимости изменения скорости воздушных потоков в местах расположения замерных пунктов. На основе анализа результатов математического моделирования выявлено количество воздуха, поступающего на станцию при разных скоростях убывающего поезда. Это объясняется тем, что, несмотря на то, что при меньшей скорости поезда наблюдается меньший расход воздуха через вестибюли, время цикла (время движения поезда по перегону) становится больше. При этом суммарное количество воздуха, определяемое произведением расхода на время цикла, остается приблизительно одинаковым.

В зависимости от скорости движения прибывающих и уходящих поездов, в сравнении с базовым вариантом, отношение расхода теплого внутреннего воздуха, удаляемого через вестибюли к поступающему наружному холодному, меняется от 0,24 до 0,35. Это показатель может быть использован в качестве критерия оценки эффективности мероприятий, проводимых для повышения температуры воздуха в вестибюлях. Если поезд прибывает на станцию со скоростью 60 км/ч, а уходит со скоростью 20 км/ч – отношение расходов составляет 0,74. Следовательно, количество теплого воздуха, которое поезд выталкивает из тоннеля на станцию, всегда много меньше, количества холодного воздуха, поступающего из атмосферы. Поэтому в дальнейших исследованиях рассмотрим только влияние скорости убывающего поезда на температуру воздуха на станции.

Обсуждение

Проведем оценку затрат требуемой тепловой энергии ВТЗ на подогрев поступающего в вестибюли станции холодного воздуха в зависимости от температуры атмосферного воздуха и скорости убывающего поезда. В качестве граничного условия принят фактический график движения, т.е. за сутки совершается 368 одинаковых циклов, соответствующих количеству пар поездов на рассматриваемом перегоне.

На рис. 3 приведены зависимости требуемой тепловой мощности установок ВТЗ для поддержания нормативной температуры воздуха в вестибюле 1 станции "Площадь Гарина-Михайловского, в зависимости от температуры наружного воздуха и скорости уходящих поездов. По графикам видно, что при снижении температуры наружного воздуха ниже $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, уходящие со скоростью 60 км/ч поезда будут создавать такие потоки воздуха в вестибюле, которые не могут быть нагреты эксплуатируемыми ВТЗ, работающими с номинальной мощностью 240 кВт (на рисунке показана пунктирной линией), т.е. ВТЗ не будет справляться со своей задачей. Если температура атмосферного воздуха опускается ниже $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, то уже и при скорости уходящих поездов 20 км/ч невозможно поддерживать требуемую температуру в вестибюле.

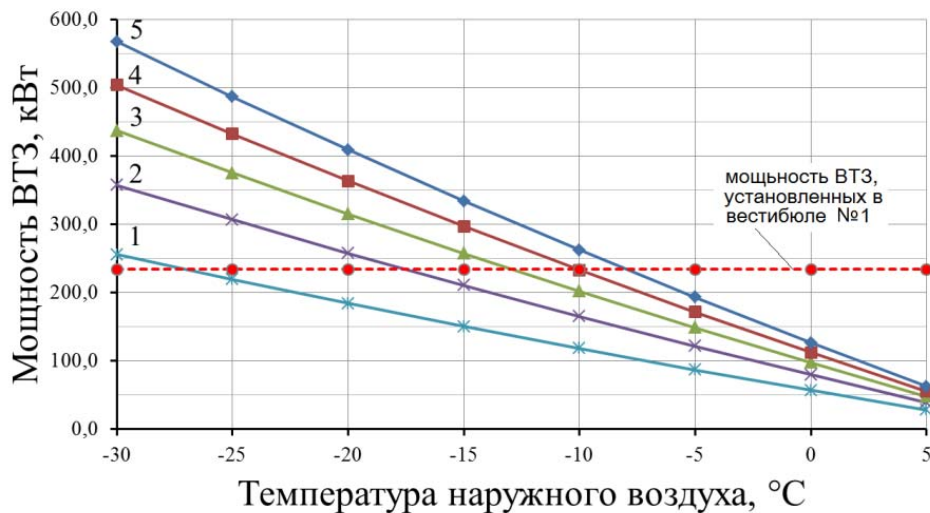


Рис. 3. Требуемая и номинальная мощность установок ВТЗ вестибюля 1, в зависимости от температуры наружного воздуха и скорости уходящих поездов:

1 – 20 км/ч; 2 – 30 км/ч; 3 – 40 км/ч; 4 – 50 км/ч; 5 – 60 км/ч

Таким образом, полученные результаты исследования, позволяют сделать вывод о том, что для поддержания нормативной температуры воздуха в вестибюле при экстремально низких температурах атмосферного воздуха, необходимо либо увеличивать тепловую мощность ВТЗ, либо значительно снижать скорость движения уходящего со станции поезда.

Заключение

Натурные исследования скорости воздушных потоков от поршневого действия уходящего поезда с тупиковой станции «Площадь Гарина-Михайловского» Новосибирского метрополитена показали, что при температуре атмосферного воздуха ниже $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ воздушно-тепловые завесы не обеспечивают подогрев поступающего на станцию холодного наружного воздуха до нормативной температуры.

Серией вычислительных экспериментов на математической модели воздухо-распределения в вентиляционной сети метрополитена выявлены зависимости скоростей движения воздушных потоков через вестибюли станции от скорости движения поездов по перегону «Площадь Гарина-Михайловского» – «Сибирская». Показано, что наиболее эффективным путем уменьшения интенсивности поступления на станцию холодного атмосферного воздуха является изменение скоростных режимов прибывающих и убывающих поездов. Показано, что когда поезд убывает со скоростью 20 км/ч, средняя скорость поступающего в вестибюль холодного воздуха по сравнению с существующей ситуацией (базовым вариантом) снижается в 2 раз. При этом воздушно-тепловые завесы с тепловой мощностью 240 кВт справятся с задачей при температуре атмосферного воздуха $-27\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Расчет тепловой мощности ВТЗ для тупиковых станций должны выполняться с запасом относительно такой же станции, но промежуточной. При расчете следует учитывать, что при дальнейшем развитии линии метро, когда тупиковая станция станет промежуточной, требования к тепловой мощности ВТЗ вестибюлей будут меньше. Поэтому следует либо делать ВТЗ для двух режимов по тепловой мощности: повышенную временную для тупикового и постоянную для промежуточного состояния, либо регулировать потери тепла с поступающим на станцию холодным наружным воздухом за счет управления режимом движения поездов.

Работа выполнена в рамках научного проекта ФНИ № гос. регистрации АААА-А17-117091320027-5.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Красюк А.М., 2006. Тоннельная вентиляция метрополитенов. Новосибирск: Наука.
2. Красюк А.М., Лугин И.В., Чигишев А.Н. Разработка режимов работы вентиляции для повышения температуры воздуха в зимний период на тупиковой станции метрополитена мелкого заложения // Известия вузов. Строительство. – 2004. – № 10. – С. 53-60.
3. СП 120.13330.2.12, 2013. Метрополитены. Актуализированная редакция СНиП 32-02-2003: утв. Приказом Минрегион РФ 30.06.2012: дата введ. 01.01.2013. Москва
4. СП 2.5.2623-10, 2010. 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. Москва.
5. Gendler S.G., Savenkov E.A. Thermophysical justification of new ventilation patterns for double-track subway tunnels in cold climate/BHRg 17th International Symposium on Aerodynamics, Ventilation and Fire in Tunnels, 2017, Lyon, France, 13-15 September. pp. 427-439.
6. Kumar K., 2017. From small-scale tunnel fire simulations to predicting fire dynamics in realistic tunnels Sanjay Tunnelling and Underground Space Technology. 61, p. 198–204.
7. Dong Y., Yingli L., Chengmei Z., Shaohua M., 2017. Multiple steady states of fire smoke transport in a multi-branch tunnel. Theoretical and numerical studies // Tunnelling and Underground Space Technology. 61, p. 189–197.
8. Gendler S.G., Sinyavina S.V. Method of Determining Characteristics for Air Heating System in Railway Tunnels in Harsh Climatic Conditions Journal of Mining Institute. 2017. Vol. 224, p. 215-222. DOI: 10.18454/PMI.2017.2.215
9. Levoni P., Angeli D., Stalio E., Agnani E., Barozzi G.S., Cipollone M., 2015. Fluid-dynamic characterisation of the Mont Blanc tunnel by multi-point airflow measurements. Tunnelling and Underground Space Technology. 48, p. 110–122.
10. Miho, S., Nobuyoshi, K., Masato, H., 2016. Experiments of evacuation speed in smoke-filled tunnel. Tunnelling and Underground Space Technology. 53, p. 61–67.
11. Angui L., Ying Z., Jiang H., Ran G., 2014. Reduced-scale experimental study of the temperature field and smoke development of the bus bar corridor fire in the underground hydraulic machinery plant. Tunnelling and Underground Space Technology. 41, p. 95–103.
12. Na M., Longhua H., Long W., Lizhong Y., Shi, Z., Longfei C., Wei T., 2014. Numerical study on the optimization of smoke ventilation mode at the conjunction area between tunnel track and platform in emergency of a train fire at subway station. Tunnelling and Underground Space Technology. 40, p. 151–159.
13. Daniel C., Ben H., Derek I., Lin M., 2017. Enhancing the piston effect in underground railway tunnels. Tunnelling and Underground Space Technology. 61, p. 71–81.
14. ANSYS Inc, 2013a. ANSYS Fluent. 15th ed., Canonsbury, PA.

15. Chin D., Guillermo R., Joaquim P., Roger H., 2016. Simulating longitudinal ventilation flows in long tunnels: Comparison of full CFD and multi-scale modelling approaches in FDS6. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 52, p. 119–126

16. Chi-Ji L., Yew K.C., Chia-Wei L., 2008. A study on underground tunnel ventilation for piston effects influenced by draught relief shaft in subway system. *Applied Thermal Engineering*. 28, p. 372–379.

17. Красюк А.М., Лугин И.В., Павлов С.А. Об эффекте возникновения циркуляционных колец и их влиянии на воздухораспределение в метрополитене мелкого заложения // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых.* – 2010. – № 4. – С. 75 – 82.

18. Красюк А.М., Лугин И.В. Исследование динамики воздушных потоков в метрополитене от возмущающего действия поездов // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых.* – 2007. – №6. – С. 101-108.

Павлов С.А. Влияние поршневого действия поездов на тепловой режим тупиковых станций метрополитена в холодный период года // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология» : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. Т. 2. – С. 172–177.*

19. Павлов С.А. О способе управления потоками воздуха в вестибюле станции метрополитена мелкого заложения в холодный период года // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология» : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. Т. 5. – С. 178–182.*

© А. М. Красюк, И. В. Лугин, 2019