

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ПРОТЯЖЕННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЯХ БАМ**

*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

*Елена Леонидовна Алферова*

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, младший научный сотрудник, тел. (383)205-30-30, доп. 179, e-mail: alferova\_el@mail.ru

В статье приведены результаты исследований воздухораспределения в протяженных железнодорожных тоннелях от поршневого действия поездов. Моделирование проводилось на примере движения товарного поезда длиной 1 км по тоннелям протяженностью 3 и 6 км путем численного эксперимента в программном пакете ANSYS Fluent. В результате исследования были получены зависимости давления воздуха на лобовой и хвостовой поверхностях поезда от его положения в тоннеле и величины аэродинамического сопротивления зазора между поездом и стенками тоннеля. Результаты были использованы для разработки квазидинамической модели поршневого действия поезда для решения задач статического воздухораспределения на сетевых моделях. Сравнение расходов воздуха в различных сечениях тоннеля, полученных с помощью пакета ANSYS Fluent и на сетевой модели, показало удовлетворительную сходимость. При этом время решения задачи для тоннеля протяженностью 3 км на сетевой модели в  $4 \cdot 10^5$  раз меньше, чем на объемной, что имеет важное практическое значение при многовариантных расчетах в проектировании системы вентиляции железнодорожных тоннелей.

**Ключевые слова:** железнодорожный тоннель, сетевая модель, тоннельная вентиляция, поршневое действие поездов, воздухораспределение.

## **STUDY OF AIR DISTRIBUTION AT ELONGATED TRANSPORT TUNNELS OF BAIKAL-AMUR MAINLINE**

*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)205-30-30, extension 179, e-mail: ivlugin@misd.ru

*Elena L. Alferova*

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Junior Researcher, phone: (383)205-30-30, extension 179, e-mail: alferova@mosk.ru

At the paper results of study of air distribution at elongated railway tunnels from piston effect of trains are represented. Simulation was carried out on the example of movement of freight train with length of 1 km at tunnels with length 3 and 6 km by numerical experiment in ANSYS Fluent software pack. As a result of the study, dependences of air pressure to front and rear surfaces of train on its position in the tunnel and on value of aerodynamic resistance of the gap between train and wall of the tunnel are obtained. The results have been used for development of quasi-dynamic model of piston effect of trains for solution of static air distribution problems on network models. Comparison of air discharge at various tunnel cross-sections obtained using ANSYS Fluent pack and network model shows satisfied repeatability. In that case, time of problem solution for a tunnel with length 3km on network model is 4·10<sup>5</sup> lower than on volume model. It has important practical meaning for multivariant calculations during designing of ventilation systems at railway tunnels.

**Key words:** railway tunnel, network model, tunnel ventilation, piston effect of trains, air distribution.

### *Введение*

Наибольшие сложности в эксплуатации тоннелей приходится на холодный период года. В этот период, вследствие экстремально отрицательных температур атмосферного воздуха и притока воды через обделку тоннелей, происходит образование наледей, препятствующих безопасной эксплуатации тоннелей. Для рационального распределения теплого воздуха по длине тоннеля необходимо решать задачу совместного действия калориферных установок, системы тоннельной вентиляции и поршневого действия поездов. Настоящая статья посвящена вопросу моделирования поршневого действия поездов в протяженных тоннелях БАМ.

Исследованию поршневого действия движущихся в тоннелях поездов посвящены работы [1–6]. В основном в них исследовались тоннели длиной до 1000 м, при длине поезда не более 150–200 м. В рассматриваемом случае длина грузового поезда составляет 1200–1500 м. В протяженных железнодорожных тоннелях, например, в Северомуйском, такой поезд движется в течение примерно 25 минут. При этом в течение 90–100 с поезд входит в тоннель, на лобовой поверхности локомотива возникает избыточное давление воздуха, инициирующее движение воздушного потока в тоннеле и в пространстве между поездом и стенками тоннеля. После входа всего поезда в тоннель на торцевой поверхности хвостового вагона возникает разрежение. Оно также участвует в перемещении воздуха по тоннелю и изменяет скорость воздуха в зазоре между поездом и стенками тоннеля. Далее, при движении поезда аэродинамическое сопротивление участка тоннеля между лобовой поверхностью локомотива и выходным порталом постоянно уменьшается, но увеличивается между хвостовым вагоном и входным порталом. Этот процесс длится около 20 минут. Затем локомотив выходит из тоннеля и повышенное давление на его лобовой поверхности исключается из процесса перемещения воздуха по тоннелю. А после того, как весь поезд покинет тоннель, воздух, вследствие инерции, продолжает двигаться в нем еще некоторое время. Очевидно, что динамика воздухораспределения в протяженных железнодорожных тоннелях весьма сложная. При этом

она обуславливает динамику обтекания движущегося состава, т.е. динамику поглощения тепла из тоннеля. Но ее закономерности необходимо знать для разработки эффективных технологических схем вентиляции тоннелей, поэтому исследование закономерностей воздухообмена и воздухораспределения в протяженных транспортных тоннелях, вызванного поршневым действием поездов, является актуальной задачей.

В работе [2] предложен способ моделирования воздухораспределения от поршневого действия поездов в тоннелях метрополитенов. Это способ апробирован на практике и показал хорошую сходимость результатов расчета с результатами измерений расходов воздуха в натуральных условиях Новосибирского и Екатеринбургского метрополитенов. Этот способ позволяет в достаточно простых сетевых CDF моделях статического воздухораспределения учитывать динамику, обусловленную поршневым действием поездов.

Целью настоящей работы является разработка математической модели воздухораспределения от поршневого действия поездов в железнодорожных тоннелях.

### *Методы и материалы*

Основными элементами для составления сетевой схемы тоннеля являются [7–11]: порталы, путевой тоннель, штольня, вентиляционные стволы, кроссинги. А также:

- для учета естественной тяги: фиктивные источники давления;
- для учета поршневого действия поезда: модель поршневого действия, включающая в себя фиктивные источники тяги, описывающие изменение давления перед поездом и за поездом, сопротивление зазора между стенкой тоннеля и поездом и сопротивление рассеяния перед поездом.

Моделирование поршневого действия при статическом воздухораспределении осуществляется с помощью метода, описанного в [2]. Суть его в том, что моделирование разности давления впереди и позади поезда, в статической модели, предлагалось представить двумя фиктивными источниками – вентиляторами. Это позволило адекватно описать фронт давления воздуха на лобовой и хвостовой поверхностях поезда. Сами вентиляторы связывались между собой аэродинамическим сопротивлением, соответствующим сопротивлению зазора между поездом и стенками тоннеля

Моделирование естественной тяги (ЕТ) произведено способом, описанным в работе [12]. Давления фиктивных источников ЕТ рассчитаны по основному закону гидростатики, в зависимости от перепада высот между порталами  $\Delta h$  и температуры атмосферного воздуха [13].

Имеются существенные отличия в параметрах элементов, входящих в математическую модель поршневого действия поезда в тоннеле метрополитена и в железнодорожном тоннеле. Во-первых, это соотношение площади сечения тоннеля к площади сечения вагона. В метрополитене вагон перекрывает примерно 50 % площади тоннеля, а, например, в железнодорожных тоннелях БАМа перекрытие

составляет только 18 %. Во-вторых – длина железнодорожного товарного состава примерно в 10 раз больше длины метropоезда. А это существенно влияет на аэродинамическое сопротивление зазора между стенками поезда и тоннеля. Также неизвестно значение сопротивления затухания при упомянутых параметрах в ж/д тоннелях. Для определения указанных параметров модели поршневого действия поезда в железнодорожном тоннеле в пакете ANSYS проведен вычислительный эксперимент. Исходные данные взяты по статистическим значениям. Средняя скорость поезда составляет 37-45 км/ч [14-15], длина грузевого поезда не должна превышать 75 вагонов (в среднем их около 57, без учета локомотива, порожняка – 105 вагонов, пассажирского поезда – 24 вагона). Длина одного грузового вагона 16.7 м, пассажирского 23.6 м. Эквивалентный радиус поперечного сечения вагона составляет 1.73 м. Площадь поперечного сечения тоннеля принималась по размерам тоннелей БАМ, имеющих схожую конструкцию, длину и эксплуатационную нагрузку (Байкальский, Кузнецовский). С учетом этих данных рассматривались тоннели длиной 3000 м и 6000 м, гидравлическим радиусом 4 м, по которому движется грузовой поезд длиной 1000 м. Атмосферное давление принято при нормальных условиях 101325 Па, температура воздуха 25 оС. Геометрические размеры тоннеля и поезда соответствуют реальным с переводом в эквивалентные для решения задачи в принятой плоской осесимметричной постановке. Такая постановка достаточно адекватно описывает геометрию и физические процессы при движении поезда по тоннелю. При такой постановке существенно экономится размер конечно-элементной модели и машинное время для расчетов. Задачи решались в нестационарной постановке при использовании динамической сетки в ANSYS Fluent 14.5 с использованием ресурсов Центра коллективного пользования «Сибирский суперкомпьютерный центр» (ЦКП ССКЦ СО РАН) на кластере G6 в распараллеленном режиме на 48 ядрах.

### *Результаты*

На рис. 2 и 3 приведены результаты моделирования: давления и расходы в сечениях, давления на лобовой и хвостовой поверхностях поезда, а также, в середине тоннеля. На рисунке 2а показана схема продольного сечения тоннеля и отмечены сечения 1–1, 2–2, и 3–3.

Сечения 1–1 и 3–3 находятся на расстоянии 10 калибров от входного и выходного порталов соответственно, сечение 3–3 проходит по центру расчетной области, сечение 2–2 является промежуточным и расположено примерно в середине тоннеля. На временной шкале, рис. 2а, показаны характерные моменты и промежутки времени: 0–9 с – разгон поезда; 10.8 с – лобовая поверхность локомотива (ЛПЛ) пересекла входной портал; 14.85 с – ЛПЛ пересекла сечение 1–1; 80.4 с – ЛПЛ пересекла сечение 2–2; 100.9 с – торцевая поверхность последнего вагона поезда (ТПП) пересекла входной портал; 150.7 с – ЛПЛ пересекла сечение 2–2, 277.7 с – ЛПЛ пересекла сечение 3–3; 281 с – ЛПЛ пересекла выходной

портал; 371,2 с – поезд целиком вышел из тоннеля (ТПП пересекла выходной портал); 373–382 с – поезд тормозит; с 382 с начинается стоянка поезда, она длится одну минуту.

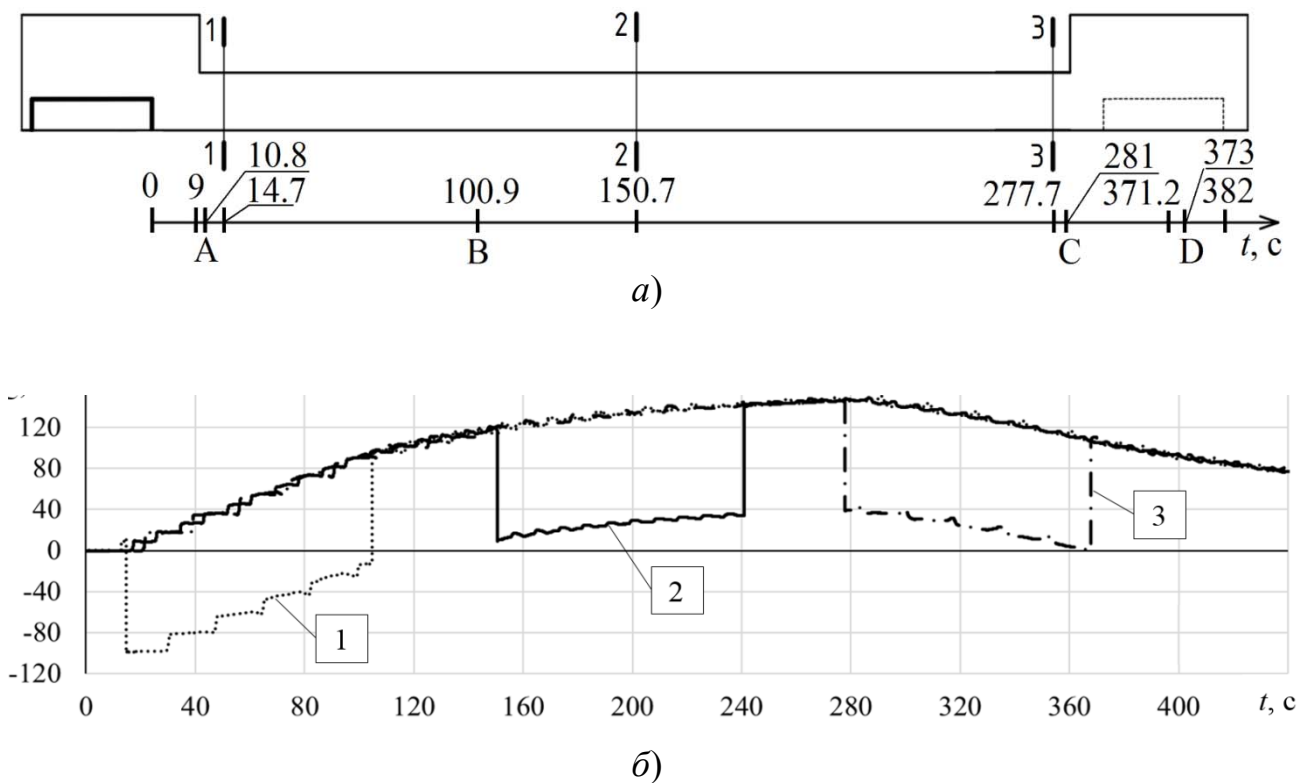


Рис. 2.  $t$  – время, с; а) схема продольного сечения тоннеля: А – поезд входит в тоннель; В – весь поезд в тоннеле; С – поезд выходит из тоннеля; D – поезд целиком вне тоннеля; б) расходы воздуха в сечениях 1–1, 2–2 и 3–3

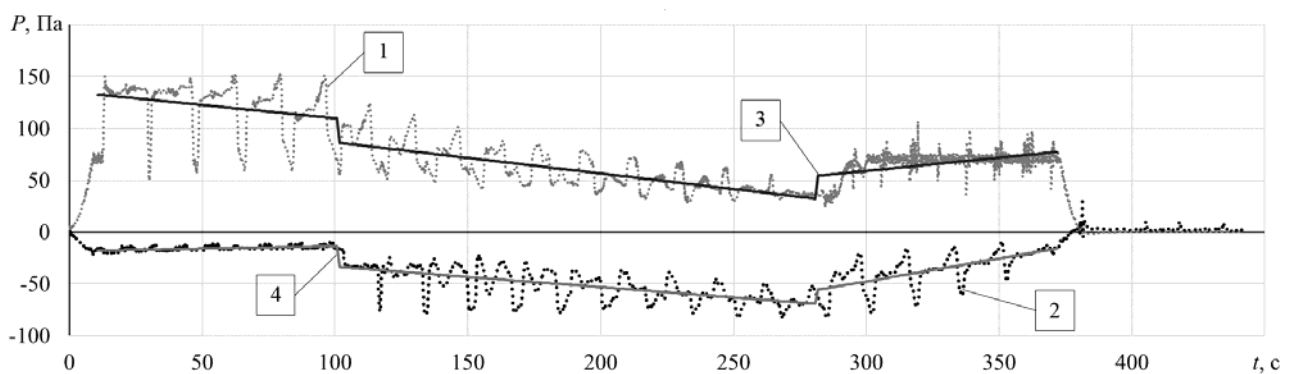


Рис. 3. Давление воздуха на лобовой поверхности локомотива и торце хвостового вагона:

1 – среднее давление на лобовой поверхности локомотива; 2 – среднее давление на торце хвостового вагона поезда; 3 – линия тренда среднего давления на лобовой поверхности локомотива; 4 – линия тренда среднего давления на торце хвостового вагона поезда

## Обсуждение

На рис. 2б видно, что изменение расхода воздуха зависит от положения поезда в тоннеле. При скорости движения поезда 40 км/ч, в момент времени 100.9 с, когда поезд полностью входит в тоннель, происходит перелом графика, расход воздуха в сечении 1-1 начинает изменяться по другой зависимости. Таким образом, при различной длине поезда этот перелом будет происходить в различные моменты времени. Для поезда длиной 1000 м (грузовой поезд средней длины) это происходит в момент времени 100.9 с, при этом расход воздуха растёт от 0 до 94 м<sup>3</sup>/с. Аппроксимируя изменение расхода воздуха  $Q_T$  (м<sup>3</sup>/с) в тоннеле до полного входа поезда в него, получаем зависимость расхода воздуха в тоннеле от длины состава  $Q_T = 1.05 \cdot t - 15.65$ , где  $t$  – момент времени, с. Моделированием воздушных потоков в железнодорожных тоннелях длиной 3 и 6 км выявлено, что расхода воздуха, инициированный поршневым действием поезда, движущегося с постоянной скоростью, является кусочной функцией, зависящей от положения поезда в тоннеле. В интервале времени от входа локомотива до входа хвостового вагона во входной портал для тоннеля длиной 3 км определяется зависимостью  $Q_T = 1.05 \cdot t - 15.65$ , для тоннеля длиной 6 км  $Q_T = 0.7t - 10.4$ . В интервале времени от входа хвостового вагона в тоннель до выхода локомотива из тоннеля для тоннеля длиной 3 км расход воздуха определяется зависимостью  $Q_T = -0.0016t^2 + 0.883t + 22$ , для тоннеля длиной 6 км  $Q_T = -0.00039t^2 + 0.36t + 30.8$ . Таким образом, для тоннеля длиной 3 км для грузового порожнего состава (т.е. поезда максимальной длины) 1750 м – перелом графика расхода происходит в момент времени 157.7 с, расход воздуха в тоннеле при этом возрастёт до 148.3 м<sup>3</sup>/с; для пассажирского поезда максимальной длины (570 м) – на 51 с (расход воздуха в тоннеле в этот момент составит 40.6 м<sup>3</sup>/с), для пассажирского поезда стандартной длины (360 м) – на 32.4 с, расход воздуха 21.9 м<sup>3</sup>/с. В работе [16] приведены результаты натурных измерений расхода воздуха в Северомуйском тоннеле. Авторы определили, что максимальный расход воздуха, вызванный поршневым действием поездов, составил 153 м<sup>3</sup>/с. Таким образом, расхождение между результатами математического моделирования и экспериментальными данными не превысило 7 %.

Анализируя графики на рис. 3, определим избыточное давление вентилятора, имитирующего передний фронт перед поездом и разрежение за хвостовым вагоном поезда. При моделировании воздухораспределения от поршневого действия поезда в протяжённом железнодорожном тоннеле осуществляется в три этапа: вход поезда в тоннель, движение всего поезда в тоннеле и выход поезда из тоннеля. На рис. 3 показаны линии тренда давления на головной и хвостовой поверхностях поезда на каждом из упомянутых этапов. Примем, что давление вентилятора, имитирующего лобовую поверхность локомотива, будет равно среднему значению линии тренда на соответствующем участке. При входе поезда в тоннель  $P_1^f = 124$  Па, при движении всего поезда по тоннелю  $P_2^f = 60$  Па и при выходе поезда из тоннеля, также,  $P_3^f = 60$  Па. Соответственно, давление вентилятора, имитирующего хвостовую поверхность при движении

всего поезда в тоннеле  $P_2^b = 60$  Па, а при выходе из тоннеля –  $P_3^b = 40$  Па. По рис. 2, а найдена зависимость сопротивления затухания (рассеяния)  $R_d(S)$ , кц, от расстояния  $S$ , м, между лобовой поверхностью локомотива и тем сечением, в котором требуется определить расход воздуха в тоннеле:

$$R_d(S) = 5 \cdot 10^{-13} \cdot S^3 - 9 \cdot 10^{-10} \cdot S^2 + 7 \cdot 10^{-7} \cdot S - 8 \cdot 10^{-3}.$$

### *Заключение*

Полученные результаты позволяют проводить квазидинамические исследования воздушных потоков от поршневого действия поездов в протяженных железнодорожных тоннелях на сетевых моделях статического воздухораспределения. Это позволяет значительно сократить время на этапе проектирования систем вентиляции тоннелей. Например, время расчета расходов воздуха в тоннеле длиной 6 км за время прохождения по нему товарного поезда составило 1089 ч в программном пакете ANSYS Fluent. Время квазидинамического расчета воздухораспределения на сетевой модели составило  $2.7 \cdot 10^{-4}$  часа. Для получения информации о расходах воздуха в тоннеле за время прохождения по нему поезда достаточно расчетов для десяти поезда в тоннеле. Таким образом, общее время расчетов не превысит  $2.7 \cdot 10^{-3}$  ч. При этом достигнутое сокращение времени расчетов составляет  $4 \cdot 10^5$ .

Путем численных экспериментов определено, что основным эксплуатационным фактором, влияющим на воздухообмен, инициированный поршневым действием движущихся поездов в протяженном железнодорожном тоннеле, является длина поезда, поскольку геометрия тоннеля и скорость прохождения в нем поезда для различных тоннелей Сибири и Дальнего востока меняются несущественно. Динамика расхода воздуха в тоннеле, при прохождении по нему поезда, имеет следующий вид: 1 – линейный во время входа поезда в тоннель; 2 – степенной после полного вхождения поезда в тоннель; 3 – линейный во время выхода поезда из тоннеля. Влияние климатических факторов, выраженное в действии естественной тяги, при обустройстве порталов тоннеля воротами имеет несущественное значение, как в теплый, так и в холодный период года.

Разработана квазидинамическая модель поршневого действия поезда, движущегося в протяженном железнодорожном тоннеле для решения задач на сетевых моделях статического воздухораспределения. Сравнение расходов воздуха в различных сечениях тоннеля, полученных с помощью пакета ANSYS Fluent и на сетевой модели показали удовлетворительную сходимость. При этом время решения задачи для тоннеля протяженностью 3 км на сетевой модели в  $4 \cdot 10^5$  раз меньше, что имеет важное практическое значение при проектировании системы вентиляции железнодорожных тоннелей.

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

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Поддержание требуемого температурного режима в Северо-Муйском тоннеле в холодный период года средствами тоннельной вентиляции. Лугин И.В., Витченко А. А. Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2014. Т. 1. № 1. С. 210-214.
2. Красюк А.М., Лугин И.В. Исследование динамики воздушных потоков в метрополитене от возмущающего действия поездов // ФТПРПИ. – 2007. – № 6. – С. 101-109.
3. Rivero J.M., González-Martínez E., Rodríguez-Fernández M. A methodology for the prediction of the sonic boom in tunnels of high-speed trains // Journal of Sound and Vibration. – 2019. – Volume 446. – P.37-56.
4. Iliadis P., Soper D., Baker C., Hemida H. Experimental investigation of the aerodynamics of a freight train passing through a tunnel using a moving model // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 2018.
5. Liu M., Zhu C., Cui T., Zhang H., Zheng W., You S. An alternative algorithm of tunnel piston effect by replacing three-dimensional model with two-dimensional model // Building and Environment. – 2018. – Volume 128. – P. 55-67.
6. Liu M., Zhu C., Zhang H., Zheng W., You S., Li B., Xue P. Mathematical modeling and sensitive analysis of the train-induced unsteady airflow in subway tunnel // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2017. – Volume 171. – P. 67-78.
7. Проектная документация. Строительство нового Байкальского тоннеля на перегоне Дельбичинда – Дабан Восточно-Сибирской железной дороги. Раздел 3. Технологические и конструктивные решения линейного объекта. Искусственные сооружения. ОАО «СтройТрест». – 2014.
8. Гендлер С. Г., Смирняков В.В., Соловьев А.Н. Исследование вентиляционного и теплового режимов Лысогорского железнодорожного тоннеля // ГИАБ. – 2006. – №S1. – С. 133-145.
9. Гендлер С. Г., Плескунов В.А. Выбор рациональной схемы проветривания Кузнецовского железнодорожного тоннеля // ГИАБ. Отдельный выпуск №13: Аэрология. – 2009. – С. 81-89.
10. Гендлер С. Г. Проблемы проветривания транспортных тоннелей // ГИАБ. Тематическое приложение «Безопасность». – 2005. – С. 281-295.
11. Бамтоннельпроект. Объекты [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.btpnsk.ru/objects>, свободный.
12. Лугин И.В., Алферова Е. Л. Моделирование действия естественной тяги в вентиляционных сетях метрополитена мелкого заложения // Горняцкая смена. Сборник трудов молодых ученых. Том 2. – 2010. – С. 64-69.
13. СП 131.13330.2012 Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99\*. – Введ. 2013–01-01. – Москва: [б.и.], 2013. Доступ из электронного фонда правовой и нормативно-технической документации «Техэксперт».
14. Краткие итоги года – Обзор компании – Годовой отчет ОАО «РЖД» за 2016 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ar2016.rzd.ru/ru/company-overview/highlights>, свободный.
15. Улучшение грузоперевозок – Повышение клиентоориентированности – Операционные результаты – Годовой отчет ОАО «РЖД» за 2016 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ar2016.rzd.ru/ru/operating-results/customer-focus/improved-freight#initiatives-to-improve-customer-service-quality>, свободный.
16. Гендлер С.Г., Смирняков В. В., Соколов В. А. Первые результаты натурных испытаний системы вентиляции Северомуйского железнодорожного тоннеля // ГИАБ. – 2005. – № S2. – С. 272-281.

© А. М. Красюк, И. В. Лугин, Е. Л. Алферова, 2019