



**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТ  
ПОРШНЕВОГО ДЕЙСТВИЯ ПОЕЗДОВ В ПРОТЯЖЕННЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ТОННЕЛЯХ**

**И. В. Лугин**

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: ivlugin@misd.ru,  
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

Проведено сравнение результатов расчета воздухообмена от поршневого действия поездов в протяженном железнодорожном тоннеле методами вычислительной аэродинамики в стационарной и нестационарной постановке. Выявлены погрешности определения воздухообмена в стационарной постановке. Обоснована корректность применения моделей сетевого статического воздухообмена с квазидинамическими моделями поршневого действия поездов для расчета проветривания тоннелей.

*Протяженный железнодорожный тоннель, поршневое действие поездов, расчет статического воздухообмена*

**MATHEMATICAL MODELING OF AIR DISTRIBUTION DYNAMICS  
FROM THE PISTON ACTION OF TRAINS IN LONG RAILWAY TUNNELS**

**I. V. Lugin**

*Chinakal Mining Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
E-mail: ivlugin@misd.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091 Russia*

The results of calculating air exchange from the piston action of trains in a long railway tunnel by computational aerodynamics methods in a stationary and non-stationary formulation are compared. The errors of determining air exchange in a stationary formulation are revealed. The correctness of applying the models of network static air distribution with quasi-dynamic models of the piston action of trains for calculating tunnel ventilation is justified.

*Long railway tunnel, piston action of trains, calculation of static air distribution*

Проветривание от поршневого действия поездов вносит существенный вклад в воздухообмен в протяженных транспортных железнодорожных тоннелях [1–4]. Сначала при входе поезда в тоннель такое проветривание носит явно нестационарный характер, затем степень нестационарности снижается, т. е. расход воздуха стремится к постоянному значению. Для определения суммарного воздухообмена от поршневого действия поездов можно воспользоваться следующими методами: 1 — вычислительной аэродинамики при нестационарной постановке с подвижной сеткой; 2 — статического сетевого воздухообмена с использованием квазидинамической модели поршневого действия поезда [5–10]. Первый метод позволяет отследить динамику расхода воздуха с высокой точностью, но требует больших вычислительных мощностей и затрат времени на расчет (около 40 суток на кластере 42 ядра для движения одного поезда в тоннеле длиной 15 км). Второй менее точен, но нетребователен к вычислительным мощностям, а время расчета составляет 1–2 с, что позволяет оперативно проводить многовариантные расчеты. Основное различие в результатах, полученных с помощью данных методов, заключается в том,

что в общем случае первым методом можно исследовать динамические процессы, а вторым — стационарные, или слабонестационарные. Данная работа посвящена проблеме оценки погрешности расчета воздухораспределения без учета его динамики, т. е. статического, и обоснованию корректности применения квазидинамической модели поршневого действия поездов без учета переходного процесса для различных эксплуатационных режимов железнодорожного тоннеля. Для оценки этой погрешности проведена серия вычислительных экспериментов с использованием метода вычислительной аэродинамики (программная реализация метода в модуле ANSYS Fluent [11]) для одной и той же расчетной задачи (описанной одинаковыми расчетными моделями) при стационарной и нестационарной постановке. Анализ результатов исследования для оценки погрешности основан на сравнении суммарного воздухообмена за время прохода поезда через тоннель, определенного с помощью упомянутых методов.

В проведенных экспериментах поршневое действие поезда моделировалось на основе представления вытесняемых поездом объемов воздуха при его движении по тоннелю. При этом сам поезд неподвижен и расположен в середине тоннеля. Такой подход позволяет существенно снизить время расчета. Задача решена в стационарной и в нестационарной плоской осесимметричной постановке. Стационарная постановка предполагает идеализированный вариант расчета, при котором поезд находится в тоннеле бесконечное время, при этом расход воздуха в тоннеле от поршневого действия поезда приобретает гипотетически возможное максимальное значение. Нестационарная постановка позволяет оценить динамику приближения реального расхода воздуха в тоннеле к максимально возможному при ограниченном времени движения в нем поезда, зависящем от длины тоннеля и скорости поезда.

В расчетах рассмотрен тоннель длиной 15343 м с поездом 1100 м, скорость поезда 75 км/ч (20.8 м/с). Диаметры тоннеля и поезда представлены как гидравлические эквивалентные и равны 7.8 и 3.9 м соответственно. Шероховатость стенок тоннеля принята 0.01 м. Исходные данные соответствуют параметрам Северомуйского тоннеля БАМ [12]. Замеры расходов воздуха относительно тоннеля проведены в двух поперечных сечениях модели: в тоннеле (обозначается на графиках как “tunnel”); — в зазоре между стенкой поезда и тоннеля относительно неподвижной стенки тоннеля (обозначается на графиках как “zazor”). При стационарном расчете в обозначение вводится “stat”.

Рассмотрено три варианта создания расхода воздуха в тоннеле от поршневого действия поезда: вариант 1 — поезд входит в тоннель и движется при начальной нулевой скорости воздуха в тоннеле; вариант 2 — поезд движется по тоннелю вскоре после того, как по нему прошел другой поезд в том же направлении, скорость воздуха в тоннеле попутная поезду; 3 — поезд движется по тоннелю в реверсивном режиме, т. е. перед его заходом в тоннель только что прошел встречный поезд, скорость воздуха в тоннеле направлена навстречу моделируемому поезду.

*Вариант 1.* Поезд движется по тоннелю при начальной нулевой скорости воздуха в тоннеле (рис. 1). При эксплуатации такой режим движения может быть, например, при проходе первого поезда после ремонтной смены. Видно, что при движении по тоннелю поезд разгоняет воздух в тоннеле, при этом расход воздуха в зазоре соответственно снижается. Интересным является то, что за время движения по тоннелю поезд разгоняет воздух до величины расхода, практически равного максимально достижимому гипотетическому. Таким образом, при квазидинамических расчетах статического воздухораспределения на сетевой модели можно принимать модель “поршневого эффекта” с представлением поезда в виде комбинации постоянно действующих вентиляторов с заданным сопротивлением зазора [5, 6] с плавающей погрешностью не более 25 % для варианта 1 с начальной нулевой скоростью воздуха в тоннеле. Погрешность определяется как отношение разности площадей фигур *abvg* и *advг* (рис. 1) под графиками *tunnel* и *tunnel stat* к площади фигуры *advг*. Физически площади этих фигур равны объему воздуха, прошедшему через тоннель за время движения поезда, от действия поршневого эффекта.

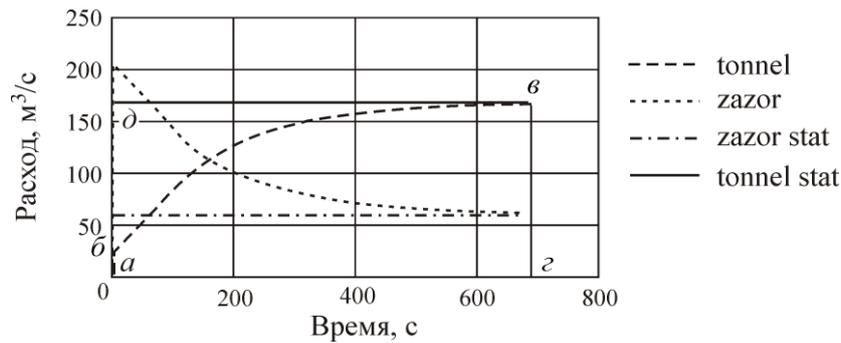


Рис. 1. Расходы воздуха в тоннеле при движении поезда и начальной нулевой скорости воздуха: tonnel — в тоннеле; zazor – в зазоре между поездом и обделкой тоннеля; tonnel stat — гипотетическое максимальное значение расхода в тоннеле; zazor stat — гипотетическое минимальное значение расхода в зазоре

После прохода поезда, в интервале времени до захода в тоннель следующего поезда, разогнанный поток воздуха в тоннеле постепенно затормаживается за счет действия сил вязкого трения. На рис. 2 показана динамика затухания расхода воздуха за время 15 мин, что соответствует частоте движения четыре поезда в час. Начальное значение расхода воздуха в тоннеле принято из расчета варианта 1 (рис. 1).

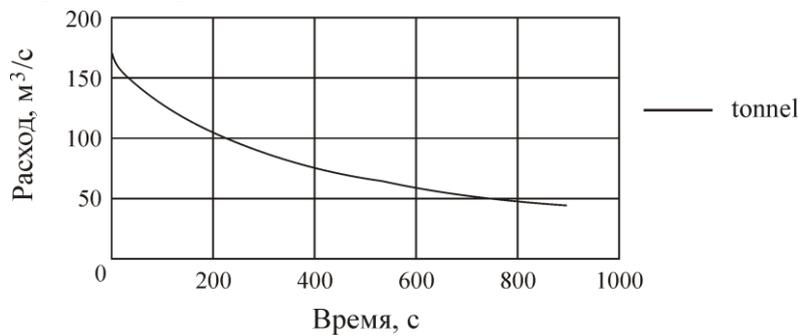


Рис. 2. Динамика расхода воздуха в тоннеле после прохода поезда

*Вариант 2.* При большой частоте движения каждый последующий поезд будет входить в тоннель, в котором поток воздуха от предыдущего поезда еще не успеет затормозиться до достаточно низкого значения чтобы им можно было пренебречь. На рис. 3 представлены результаты расчета расходов воздуха в тоннеле, когда следующий поезд входит в тоннель через 900 с после выхода из тоннеля предыдущего поезда (частота движения 4 пар/ч). При наличии попутной поезду скорости воздуха в тоннеле динамика роста расхода существенно увеличивается по сравнению с результатами на рис. 1, и погрешность использования квазидинамической модели при сетевом расчете статического воздухораспределения снижается до величины менее 10%. Способ определения погрешности такой же, как в варианте 1.

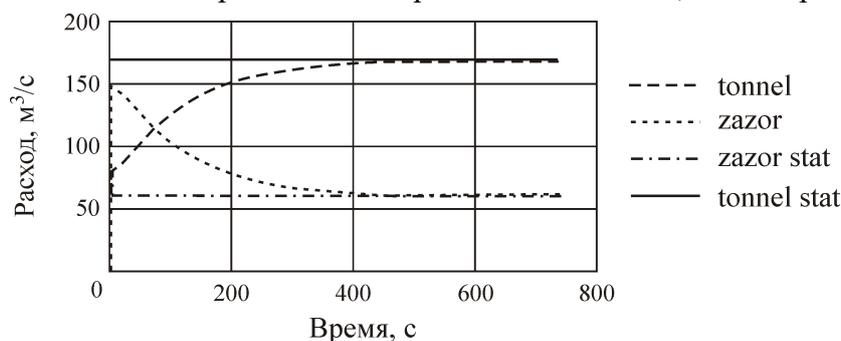


Рис. 3. Расходы воздуха в тоннеле при движении поезда и начальной попутной поезду скорости воздуха

При этом частота движения 6 пар/ч, в тоннеле постоянно находится как минимум один поезд, а некоторое время в тоннеле может быть даже два поезда: один входит в западный портал, другой выходит из восточного. Поэтому снижения расхода воздуха в тоннеле вообще не будет, он не успеет затормозиться. Учитывая, что частота движения 6 пар/ч является расчетной для нового Северомуйского тоннеля, этот режим воздухораспределения будет характерен для тоннеля практически все время его эксплуатации. Погрешность использования квазидинамической модели при сетевом расчете снижается до практически несущественной величины.

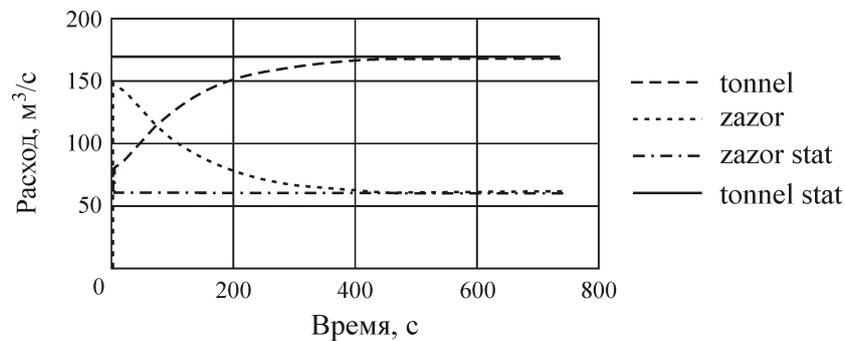


Рис. 3. Расходы воздуха в тоннеле при движении поезда и начальной попутной поезду скорости воздуха

*Вариант 3.* Рассмотрим случай реверсивного движения, когда поезда заходят поочередно с разных порталов тоннеля. При этом начальная скорость воздуха в тоннеле направлена навстречу поезду, и для достижения расхода воздуха, попутного поезду, должен будет опрокинуться начальный поток воздуха в тоннеле. Результаты расчета представлены на рис. 4. Видно, что начальный расход воздуха в тоннеле имеет отрицательную величину, т. е. направлен противоположно движению поезда. Однако динамика изменения расхода воздуха гораздо больше, чем при начальной нулевой и начальной ненулевой попутной скоростях воздуха и попутный поток воздуха приобретает максимальное значение гораздо быстрее. Погрешность расчета без учета динамики составляет около 19.5 %.

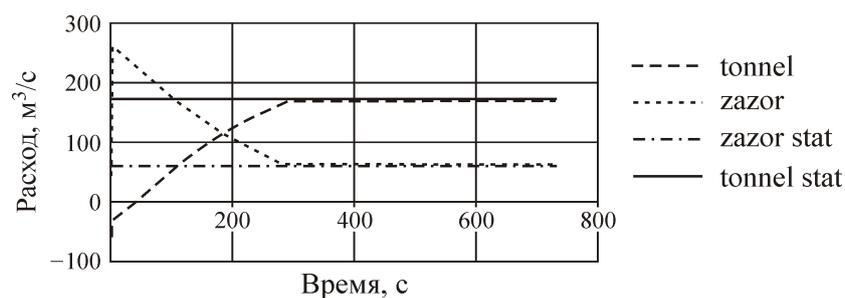


Рис. 4. Расходы воздуха в тоннеле при движении поезда и начальной противоположной поезду скорости воздуха

## ВЫВОДЫ

Использование квазидинамических моделей расчета установившегося воздухораспределения в протяженных железнодорожных тоннелях приводит к погрешности определения воздухообмена, которая составляет до 25 % за один проход поезда при различных режимах эксплуатации тоннеля. При одностороннем (штатном) режиме эксплуатации эта погрешность не превышает 10%, что позволяет обоснованно применять эту модель при расчете тоннельной вентиляции.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Krasyuk A. M., Lugin I. V., and Alferova E. L.** Study of air distribution at elongated transport tunnels of Baikal-Amur mainline, *Interexpo Geo-Sibir*, 2019, vol. 2, no. 4, pp. 114–121. [**Красюк А. М., Лугин И. В., Алферова Е. Л.** Исследование воздухораспределения в протяженных транспортных тоннелях БАМ // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. — 2019. — Т. 2. — № 4. — С. 114–121.]
2. **Gendler S. G. and Sinyavina S. V.** Features of control of the new Baykalsk railway tunnel ventilating mode, *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2015, no. 11, pp. 173–179. [**Гендлер С. Г., Синявина С. В.** Особенности управления вентиляционным режимом нового Байкальского железнодорожного тоннеля // *ГИАБ*. — 2015. — № 11. — С. 173–179.]
3. **Gendler S. G. and Pleskunov V. A.** Selecting efficient airing circuit for the Kuznetsovsky Tunnel, *Mining Information and Analytical Bulletin*, Special issue 13: Aerology, 2009, pp. 81–89. [**Гендлер С. Г., Плескунов В. А.** Выбор рациональной схемы проветривания Кузнецовского железнодорожного тоннеля // *ГИАБ. Отд. вып. № 13: Аэрология*. — 2009. — С. 81–89.]
4. **Gendler S. G., Smirnyakov V. V., Sokolov V. A.** First results of ventilation network tests in the Severomuysky Railway Tunnel, *Mining Information and Analytical Bulletin* Special issue S2, 2005, pp. 272–281. [**Гендлер С. Г., Смирняков В. В., Соловьев А. Н.** Исследование вентиляционного и теплового режимов Лысогорского железнодорожного тоннеля // *ГИАБ*. — 2006. — № S1. — С. 133–145.]
5. **Krasyuk A. M. and Lugin I. V.** Investigation of the dynamics of air flows generated by the disturbing action of trains in the metro, *Journal of Mining Science*, 2007, vol. 43, no. 6, pp. 87–94. [**Красюк А. М., Лугин И. В.** Использование модели статического воздухораспределения при исследовании динамики воздушных потоков от возмущающего действия поездов в метрополитене // *ФТПРПИ*. — 2007. — № 6. — С. 87–94.]
6. **Krasyuk A. M., Lugin I. V., and Pavlov S. A.** Experimental research into air distribution in a terminal subway station, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, vol. 85, March, pp. 21–28.
7. **Kuznetsov A. S. and Lukin S. M.** Flow algorithms used to calculate air distribution in ventilation networks, *Journal of Mining Science*, 25(5), 1989, pp. 56–63. [**Кузнецов А. С., Лукин С. М.** О применении потоковых алгоритмов для расчета воздухораспределения в вентиляционных сетях // *ФТПРПИ*. — 1989. — № 5. — С. 56–63.]
8. **Cross D., Hughes B., and Ma D.L.** A validated numerical investigation of the effects of high blockage ratio and train and tunnel length upon underground railway aerodynamics. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 146, 2015, pp. 195–206.
9. **Marta López González, Mónica Galdo Vega, Jesús Manuel Fernández Oro, Eduardo Blanco Marigorta.** Numerical modeling of the piston effect in longitudinal ventilation systems for subway tunnels, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, vol. 40, pp. 22–37.
10. **Wu Yan, Gao Naiping, Wang Lihui, and Wu Xiping.** A numerical analysis of airflows caused by train-motion and performance evaluation of a subway ventilation system. *Indoor and Built Environment* 2014, vol. 23, no. 6, pp. 854–863.
11. **ANSYS Inc**, 2013a. *ANSYS Fluent*. 15th ed., Canonsbury, PA.
12. **Project Documentation.** Construction of the New Baikal Tunnel in the Delbichinda–Daban Trackside of the East Siberian Railway. Section 3: Technological and Design Solutions for a Linear Object. *Artificial Structures*. Stroy-Trest, 2014 (in Russian)