

*Е. Л. Алферова¹**

Определение аэродинамических сопротивлений элементов вентиляционной сети метрополитена с двухпутным тоннелем

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: alferova_el@mail.ru

Аннотация. В работе представлены данные по аэродинамическим сопротивлениям основных элементов вентиляционной сети метрополитена с двухпутным тоннелем и станциями закрытого типа. Описаны способы их получения: натурные эксперименты, вычислительное моделирование и аналитический расчет по известным методикам. Представленные результаты позволяют в дальнейшем проводить исследования вентиляционных сетей метрополитена с двухпутным тоннелем и станциями закрытого типа для подбора вентиляционного оборудования при изменении режимов работы метрополитена и для оценки влияния различных факторов на воздухообмен тоннелей и станций.

Ключевые слова: вентиляция, аэродинамическое сопротивление, метрополитен, воздухораспределение

*E. L. Alferova¹**

Definition of Aerodynamic Resistances of Elements of the Ventilation Network of the Metro with a Double-track Tunnel

¹ Chinakal Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: alferova_el@mail.ru

Abstract. The paper presents data on the aerodynamic resistances of the main elements of the ventilation network of the metro with a double-track tunnel and closed-type stations. The methods of obtaining them are described: full-scale experiments, mathematical modeling and analytical calculation according to known methods. The presented results make it possible to further conduct studies of metro ventilation networks with a double-track tunnel and closed-type stations for the selection of ventilation equipment when changing metro operating modes and to assess the impact of various factors on the air exchange of tunnels and stations.

Keywords: ventilation, aerodynamic resistance, underground, air distribution

Введение

Линия метро содержит множество ветвей и узлов. Рассчитывать воздухораспределение в них вручную затруднительно, а при многовариантном исследовании невозможно, поэтому численное решение воздухораспределения необходимо производить на основе статического воздухораспределения (методами сетевого моделирования) [1–6]. Для создания сетевой математической модели вентсети требуется знать сопротивления ее элементов. То есть определение потерь на трение и на местных сопротивлениях отдельных участков вентиляционной сети необходимо при проектировании системы вентиляции метрополитена, для разработки эффективных режимов и подбора вентиляционного оборудования.

Целью работы является определение сопротивлений различных элементов вентиляционной сети метрополитена с двухпутным тоннелем при различных планировочных и топологических решениях. В основном определение потерь производится по известным методикам [7–12].

Методы и материалы

Математическая модель статического воздухораспределения подчиняется трем законам: сохранения массы, принципу минимума мощности и закону сопротивления для горных выработок [13–14]. Для набора сетевой математической модели и исследования вентиляционной сети необходимо иметь полные сведения о ее топологии и аэродинамическом сопротивлении ее участков. Основу топологической схемы вентиляционной сети тоннельной вентиляции составляют перегонные тоннели и станции. Помимо транспортных тоннелей, путями движения воздуха являются вентиляционные сооружения. В работе рассматривается метрополитен со станциями закрытого типа. Для элементов вентиляционной сети, которые можно представить, как воздухопроводы постоянного калибра, аэродинамический коэффициент сопротивления находится через потери давления на трение. Для остальных элементов аэродинамический коэффициент сопротивления находится через потери давления в местных сопротивлениях. Все сопротивления приведены к виду «коэффициент аэродинамического сопротивления» R_{ad} , Н·с²/м⁸. Определяются они тремя способами: для протяженных участков с неизменяемым диаметром – по потерям на трение, для элементов с резким изменением диаметра – по изменению полного давления на входе и выходе из местного сопротивления, для элементов венткамер, пассажирских выходов – на основе экспериментальных данных.

Потери давления ΔP при движении воздуха по длинной прямой трубе определяются по формуле Дарси – Вейсбаха [9]:

$$\Delta P = \frac{\lambda \rho v^2}{2 D_r} l, \quad (1)$$

где λ – коэффициент сопротивления трения; $\rho = 1,2$ кг/м³ – плотность воздуха; v – скорость потока, м/с; l – длина канала, м; $D_r = 4F/\Pi$ – гидравлический диаметр тоннеля, м; F – площадь сечения, м²; Π – периметр сечения, м.

Коэффициент сопротивления трения λ зависит от относительной шероховатости трубы $Re(k_s/D_r)$, мм/м. Для условий двухпутного тоннеля относительная шероховатость будет превышать значение 500 мм/м и в этом случае коэффициент сопротивления трения определяется формулой Шифринсона для вполне шероховатых труб [9]:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{k_s}{D_r} \right)^{0,25}, \quad (2)$$

где k_s – абсолютная эквивалентная шероховатость поверхности канала, мм. Зависит от материала обделки канала. Принимает следующие значения для различных поверхностей [10].

Закон сопротивления в рудничной аэрогазодинамике имеет вид:

$$\Delta P = R_{ad} Q^2, \quad (3)$$

где R_{ad} – аэродинамическое сопротивление ветви, Н·с²/м⁸; Q – расход воздуха в ней, м³/с.

Потери давления ΔP при движении воздуха по длинной прямой трубе определяются, как уже было показано выше, по формуле (1). Приравнивая (1) и (3), получаем:

$$R_{ad} Q^2 = \frac{\lambda \rho v^2}{2D_r} l,$$

отсюда коэффициент аэродинамического сопротивления для одного метра канала:

$$R_{ad} = \frac{\lambda \rho v^2}{Q^2 2D_r},$$

а учитывая, что $Q = F \cdot v$, коэффициент аэродинамического сопротивления одного метра прямого канала составит:

$$R_{ad} = \frac{\lambda \rho}{F^2 2D_r}. \quad (4)$$

К элементам с резким изменением диаметра можно отнести люки между путевым каналом и вентосеком дымоудаления, сопротивления, как уже было сказано выше, определяется по изменению полного давления на входе и выходе из местного сопротивления:

$$R_{ad} = \frac{P_{tot1} - P_{tot2}}{Q^2}, \quad (5)$$

где P_{tot1} , P_{tot2} – полные давления на входе и выходе из местного сопротивления; Q – расход воздуха, проходящий через местное сопротивление.

На рис. 1 показана трехмерная модель двухпутного тоннеля для определения сопротивления люков в вентканал дымоудаления. В качестве граничных условий задаются на входе в расчетную область:

– постоянная подача свежего воздуха на встречу эвакуирующимся с требуемой скоростью $V_{тр}$ (*Velocity Inlet*) с одной стороны;

– постоянная подача свежего воздуха для обеспечения незадымления второго плеча тоннеля со скоростью $V_{вз}$ (*Velocity Inlet*) с другой стороны.

На выходе из расчетной области на границах вентиляционного отсека задается давление 101325 Па (P_{out} – *Pressure Outlet*), т.к. задача внутренняя, эти поверхности работают в модели, как «сток». Задать иные граничные условия, более жесткие, нежелательно, иначе не обеспечивается сходимость решения (возникает возвратный поток на входных границах).

Аналогичным образом определяются аэродинамические сопротивления для помещений станции закрытого типа. На рис. 2 показаны трехмерная модель станции.

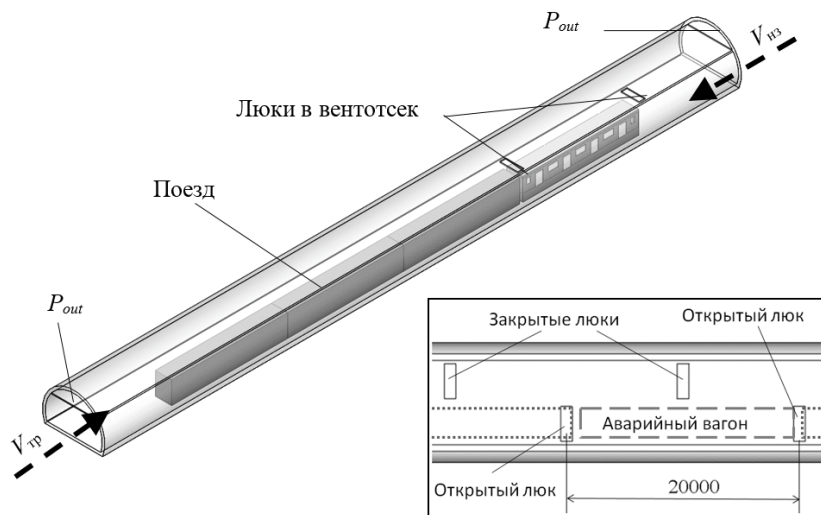


Рис. 1. Геометрическая модель и граничные условия к определению аэродинамического сопротивления люков к вентканал дымоудаления в двухпутном тоннеле

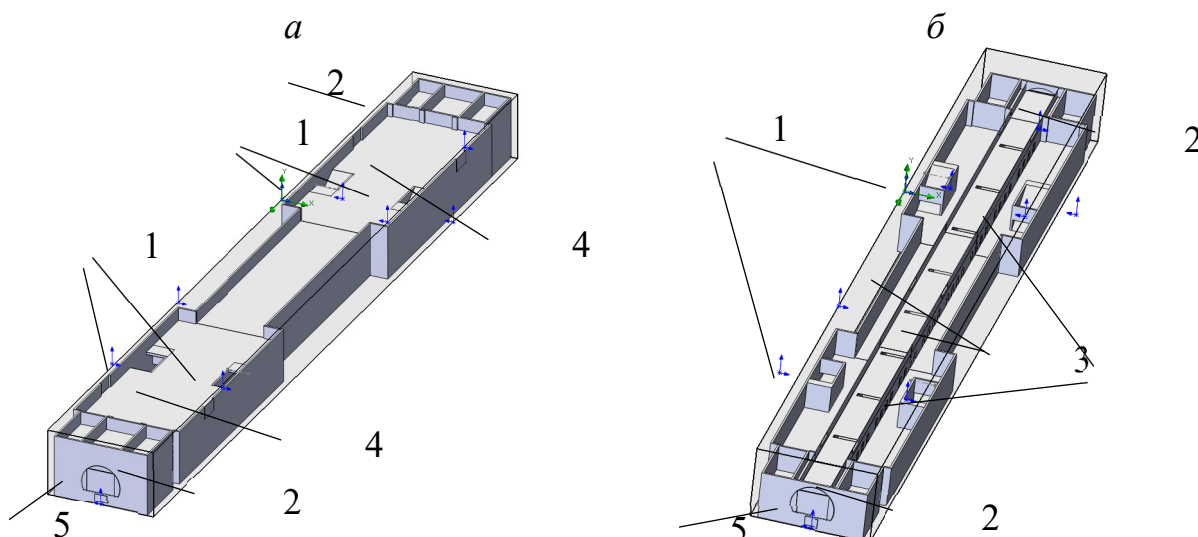


Рис. 2. Трехмерная модель станции закрытого типа метрополитена с двухпутным тоннелем. (а) – кассовый зал; (б) – платформы станции; 1 – эскалаторные спуски; 2 – установки тоннельной вентиляции; 3 – платформа; 4 – платформа; 5 – тоннель

Результаты

Значения коэффициентов аэродинамического сопротивления по формуле (4) составляют:

- для путевого отсека тоннеля $R_{ad} = 130 \cdot 10^{-8} \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8$;
- для вентиляционного отсека $R_{ad} = 2770 \cdot 10^{-8} \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8$.

Аэродинамическое сопротивление одно люка составляет $0,01134 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8$.

Аэродинамические сопротивления элементов вентиляционных камер будут различаться для каждого конкретного объекта, на рис. 3 приведены аэродинамические сопротивления венткамер Новосибирского метрополитена, полученные в результате обследования вентиляционной системы, проведенного сотрудниками Лаборатории рудничной аэродинамики ИГД СО РАН А. М. Красюком и И. В. Лугиным [12].

Величины аэродинамических сопротивлений будут отличаться для станций с отличными конструктивными особенностями и геометрическими характеристиками. Для станции метро «Гусинобродская» Новосибирского метрополитена аэродинамические характеристики участков вентиляционной сети получены в работе [12] и приведены на рис. 4.

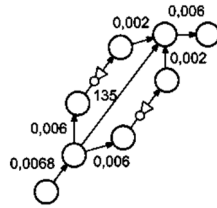


Рис. 3. Значения R_{ad} , $10^{-1} \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8$, для вентиляционной камеры

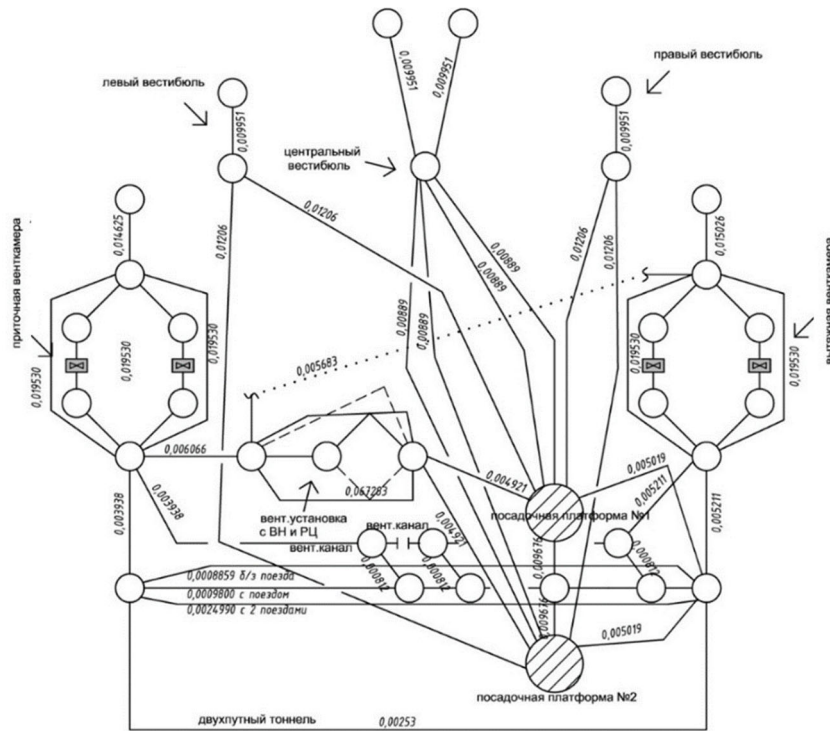


Рис. 4. Сетевая математическая модель станции закрытого типа метрополитена с двухпутным тоннелем на примере станции Новосибирского метрополитена «Гусинобродская»

Обсуждение

Полученные результаты имеют практический характер и будут полезными, как для проектировщиков вентиляции, так и для исследователей, занимающихся тематикой проветривания метрополитенов [16–17]. Полученные данные можно было бы дополнить натурными измерениями, однако исследования [18–19], проведенные для однопутных тоннелей, имеют хорошую сходимость результатов моделирования и натурных съемок.

Заключение

В работе собраны данные по аэродинамическим сопротивлениям основных элементов вентиляционной сети метрополитена с двухпутным тоннелем и станциями закрытого типа, что позволяет в дальнейшем проводить исследования вентиляционных сетей для подбора вентиляционного оборудования при изменении режимов работы метрополитена и для оценки влияния различных факторов на воздухообмен тоннелей и станций.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта ФНИ номер государственной регистрации №121052500147-6.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зайцев А.В., Казаков Б.П., Кашников А.В., Кормщиков Д.С., Круглов Ю.В., Левин Л.Ю., Мальков П.С., Шалимов А.В. Аналитический комплекс «Аэросеть». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №ru2015610589, 2015. № заявки: 2014613790. Дата регистрации: 24.04.2014. Дата публикации: 14.01.2015
2. Меренков А.П., Хасилев В. Я. Теория гидравлических цепей – М.: Наука, 1985. – 280 с.
3. Круглов Ю.В. Исследование методов расчета стационарного воздухораспределения в вентиляционных сетях и их реализация в программном комплексе «Аэросеть». – Стратегия и процессы освоения георесурсов: материалы ежегодной научной сессии Горного Института УрО РАН по результатам НИР в 2007 г.. Пермь, 2008. – С. 232-235
4. Казаков Б.П., Круглов Ю. В., Исаевич А. Г., Левин Л. Ю. Разработка программно-вычислительного комплекса «Аэросеть» для расчета вентиляционных сетей шахт и рудников // ГИАБ, 2006. – №S1. – С. 21-33.
5. Бурлаков Д.Д., Федотова В.П., Скопинцева О.В. Исследование влияния поршневого движения поездов метрополитена на обеспеченность воздухом станций метро // ГИАБ, 2019. – №S19. – С. 28–36.
6. Кузнецов А.С., Лукин С.М. Об одном подходе к расчету воздухораспределения в рудничных вентиляционных сетях: сборник научных трудов «Управление газодинамическими явлениями в шахтах»; ИГД СО АН СССР. – Новосибирск, 1986. – С. 37–39.
7. Фомичев В.И. Вентиляция тоннелей и подземных сооружений. – Л.: Стройиздат, Ленингр. Отд-ние, 1991. – 200 с.
8. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
9. Посохин В.Н. Аэродинамика вентиляции. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2008. – 209 с.
10. Цодиков В.Я. Вентиляция и теплоснабжение метрополитенов. – М.: Недра, 1975. – 237 с.
11. Долинский Е.А., Кирич Р.С. О расчетном определении коэффициентов аэродинамического сопротивления горных выработок // Известия ВУЗов. Горный журнал. – 1990. – № 6. – С. 53-57.

12. Красюк А. М., Лугин И.В. Вентиляция метрополитенов. – Новосибирск: СО РАН: Наука: Изд-во СО РАН, 2019. – 316 с.
13. Цой С., Рогов Е.И. Основы теории вентиляционных сетей. – Алма-Ата: Наука, 1965. – 284 с.
14. Цой С., Рязанцев Г.К. Принцип минимума мощности и оптимальная политика управления вентиляционными и гидравлическими сетями. – Алма-Ата: Наука, 1968. – 259 с.
15. Кияница Л. А. Тепло-массообменные процессы в подземных сооружениях станции закрытого типа метрополитена с двухпутным тоннелем: дис. канд. техн. наук: 25.00.20. – Новосибирск, 2018. – 194 с.
16. Krasyyuk A.M., Lugin I.V., Alferova E.L., Kiyanytsa L.A. Evaluation of Ventilation Flow Charts for Double-Line Subway Tunnels without Air Chambers // Journal of Mining Science, 2016. – Vol. 52. – № 4. P. 740-751.
17. Krasyyuk, A.M., 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. №43(6). P. 655–661.
18. Krasyyuk A.M., Lugin I.V., Pavlov S.A. Circulatory Air Rings and Their Influence on Air Distribution in Shallow Subways // Journal of Mining Science, 2010. – Vol. 46. – № 4. –P. 431-437.
19. Lugin I.V., Alferova E.L. Integrated Performance Analysis of Ventilation Schemes for Double-Line Subway Tunnel // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019. – Vol.262. DOI 10.1088/1755-1315/262/1/012043

© *Е. Л. Алферова, 2023*