

Анализ влияния местных сопротивлений горных выработок на общешахтное аэродинамическое сопротивление

С.С. Кобылкин ✉, В.К. Ушаков, И.И. Кузнецов

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация
✉ kobylikin.s@isis.ru

Резюме: Целью данной работы является количественная оценка влияния местных аэродинамических сопротивлений на общешахтное сопротивление, учитывающая сопротивление трения. Проведенные исследования включают в себя лабораторные эксперименты, компьютерное моделирование в ПО Ansys CFD и аналитические выводы. В результате проведенных исследований уточнена зависимость величины местных сопротивлений при поворотах горных выработок. Установлено, что величина местного сопротивления по всем участкам может превышать 10% от общешахтного аэродинамического сопротивления трения. Это зависит от геометрических параметров горных выработок, вследствие чего возможен значительный рост отношения величины местных сопротивлений к величине аэродинамического сопротивления трения. Доказано, что существенное влияние имеет соотношение двух коэффициентов – коэффициента трения и коэффициента местных сопротивлений. Чем больше резких поворотов имеет горная выработка, тем больше отношение величины местных сопротивлений к величине аэродинамического сопротивления трения. Следовательно, необходим отдельный учет данного вида сопротивления при проектировании вентиляции шахт.

Ключевые слова: безопасность, шахта, вентиляция, местное аэродинамическое сопротивление, депрессия, схема проветривания

Для цитирования: Кобылкин С.С., Ушаков В.К., Кузнецов И.И. Анализ влияния местных сопротивлений горных выработок на общешахтное аэродинамическое сопротивление. *Горная промышленность*. 2024;(2):93–96. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-2-93-96>

Analysis of the impact of local resistance of mine workings on the total mine air-flow resistance

S.S. Kobylikin ✉, V.K. Ushakov, I.I. Kuznetsov

National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation
✉ kobylikin.s@isis.ru

Abstract: This paper aims to provide a quantitative assessment of the effect of local aerodynamic resistance on total mine air-flow resistance with account for the friction resistance. The research includes laboratory tests, computer simulations in the Ansys CFD software as well as analytical inferences. The performed studies specified the magnitudes of local resistances at the turnings of mine workings. It has been established that the value of local resistance in all the sections can exceed 10% of the total mine aerodynamic friction resistance. This depends on the geometric parameters of the mine workings, which may result in a significant increase in the ratio of the local resistance value to the aerodynamic friction resistance value. The correlation of the two coefficients, i.e. the friction coefficient and the coefficient of local resistances, are proved to have a significant impact. The sharper the turns of the mine workings are, the greater the ratio of the local resistance to the aerodynamic friction resistance value is. Therefore, it is necessary to take this type of resistance into account when designing mine ventilation systems.

Keywords: safety of coal mines, coal mine, mine ventilation, local aerodynamic resistance, ventilation diagram

For citation: Kobylikin S.S., Ushakov V.K., Kuznetsov I.I. Analysis of the impact of local resistance of mine workings on the total mine air-flow resistance. *Russian Mining Industry*. 2024;(2):93–96. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-2-93-96>

Введение

Безопасность угольных шахт зависит от корректных научно обоснованных проектных решений. Проветривание шахт является ключевой составляющей безопасности и эффективности горных работ. При проектировании вентиляции одним из важных моментов является определение величины аэродинамического сопротивления. Оно включает в себя три вида: сопротивление трения, местные и лобовые сопротивления. В настоящее время два последних

вида не учитываются или величину местных сопротивлений (R_m , k_μ) принимают равной 10% от общего сопротивления трения ($R_{тр}$, k_μ), где $1 k_\mu = 1 k_{\mu} \cdot c^2 / M^8 = 9,81 \text{ Н} \cdot c^2 / M^8$ [1]. Математически это можно записать как

$$R_m \leq 0,1 \cdot R_{тр}. \quad (1)$$

Данный подход к учету местных сопротивлений является общепринятым. Однако этот подход требует уточнения с учетом существующих условий ведения горных работ

по добыче угля подземным способом, так как изменились аэродинамические параметры, режимы и схемы проветривания (например, увеличилась величина площади сечения горных выработок, существенно выросли скорости движения воздуха, появились новые типы крепи). Кроме того, появилась возможность использовать новые инструменты в исследованиях, в частности, трехмерное моделирование.

История изучения местных аэродинамических сопротивлений

Вопросу изучения величины местных сопротивлений посвящено относительно немного работ. Первый в России фундаментальный труд выполнен А.А. Харевым. Он в 1949 г. в Московской горной академии под руководством академика А.А. Скочинского написал и защитил диссертацию по теме «Методы подсчета местных вентиляционных сопротивлений в шахтных сетях и способы снижения их» [2]. Данная работа охватывала все исследования, выполненные на тот момент в СССР и по всему миру. В исследовании приведены справочные данные по коэффициентам местных сопротивлений и отмечена существенная величина дополнительной депрессии, затрачиваемой на преодоление местных сопротивлений, как для угольных шахт, так и для рудников. Величина местных сопротивлений в общешахтном сопротивлении трения для угольных шахт находится в диапазоне от 8 до 80% [3].

Гораздо позже изучением величины местных сопротивлений для условий калийных рудников занимались в пермской научной школе. В Пермском государственном техническом университете в 1995 г. под руководством А.Е. Красноштейна защищена диссертация Л.М. Веденевой [4] и в Горном институте УрО РАН под руководством Л.Ю. Левина защищена диссертация М.А. Семина [5]. В работе [4] отмечается существенное влияние местных сопротивлений для рудников, при этом сообщается о незначительном влиянии местных сопротивлений в угольных шахтах, но доказательств этому не приводится. В целой серии работ [5–7] предлагается способ учета местных сопротивлений для рудников, данные работы весьма актуальны, но требуется их развитие для условий угольных шахт.

В работе [8] опытным путем доказано большое влияние местных сопротивлений в воздуховодах. Так, при проветривании строящихся стволов в Норильске депрессия, затрачиваемая на преодоление сопротивления трения, равна депрессии, затрачиваемой на преодоление местных сопротивлений.

Аналитические исследования значения местных сопротивлений

Величина аэродинамического сопротивления трения может быть рассчитана по формуле ([1], с. 64)

$$R_{тр} = \alpha \cdot \frac{L \cdot P}{S^3} \tag{2}$$

где $R_{тр}$ – аэродинамическое сопротивление трения, $\text{кг} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8$; L – длина горной выработки или воздуховода, м; S – площадь сечения горной выработки или воздуховода, м^2 ; P – периметр горной выработки или воздуховода, м; α – коэффициент аэродинамического сопротивления трения горной выработки или воздуховода, $\text{кг} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$. Данный коэффициент меняется в широком диапазоне, по справочным данным от $0,0002 \text{ кг} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$ [1, табл. 7.6] до $0,0044 \text{ кг} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$ [1, табл. 7.13].

Величина местного аэродинамического сопротивления рассчитывается по формуле ([1], формула (7.6))

$$R_M = \xi \frac{\gamma}{2 \cdot g \cdot S^2} \tag{3}$$

где ξ – безразмерный коэффициент местного сопротивления; g – ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; γ – удельный вес воздуха, $\gamma = 1,2 \text{ кг/м}^3$.

Для поворота горной выработки коэффициент ξ может быть определен по формуле ([1], формула (7.43))

$$\xi_{пов} = k_{пр} \cdot \lambda^2 = k_{пр} \left(\frac{\pi \lambda^0}{180} \right)^2 \tag{4}$$

где $k_{пр}$ – коэффициент пропорциональности, $k_{пр} = 0,57$; λ , λ^0 – угол поворота, в радианах и градусах соответственно.

В Горном институте НИТУ МИСИС на кафедре БЭПП были проведены лабораторные исследования влияния угла поворота на величину коэффициента местных сопротивлений. Лабораторная установка является учебной (рис. 1, а). Стенд представляет из себя металлическую трубу с диаметром 50 мм. Труба имеет четыре поворота – на 20, 50, 90 и 120°. В ней движется воздух со скоростью 2 м/с. Измерения перепада статического давления проводились микроманометрами ММН-2400 (фактор прибора $K = 0,2$) и Fuess (фактор прибора $K = 0,05$).

Также было проведено трехмерное параметрическое моделирование в программе Ansys CFD. Модель представлена на рис. 1, б. Граничные условия были приняты по данным лабораторных измерений. Для оптимизации расчётов был задействован модуль Design Exploration, в котором угол наклона трубы был переменной величиной при определении депрессии поворотов.



Рис. 1
Лабораторный стенд по определению коэффициента местных сопротивлений (а) и компьютерная модель в ПО Ansys CFD (б)



Fig. 1
A laboratory bench for defining the local resistance coefficient (a) and a computer model built in the Ansys CFD software (б)

Полученные данные (рис. 2) подтверждают используемую зависимость для определения коэффициента местных сопротивлений (ξ). Отметим, что при повороте на 90° величина коэффициента $\xi = 1,2$. При этом надо отметить, что коэффициент ξ не зависит от каких-либо параметров, кроме угла поворота (см. формулу (4)). Отметим характер кривой, полученной в результате численного моделирования. При углах поворота от 0 до 20° график имеет тенденцию выполаживания и не стремится к 0. Скорее всего, так

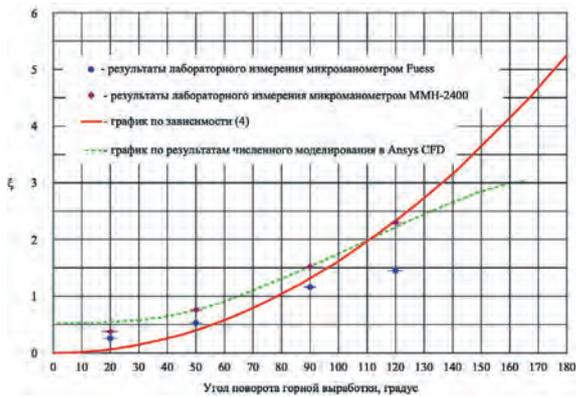


Рис. 2
Результаты сравнения коэффициента местных сопротивлений, полученного в лаборатории, с расчётным значением (в рис град)

Fig. 2
Results of comparing the local resistance coefficient obtained in the laboratory with the calculated value

получается из-за того, что в лабораторной работе и при моделировании не рассматривается сопротивление трения, это является допущением. А также график имеет тенденцию к выполаживанию при угле поворота, начиная со 170°.

Рассмотрим последовательное соединение горных выработок (упрощенный случай). Тогда общее сопротивление трения ($R_{общ\ тр}$) будет равно сумме сопротивлений трений ветвей, составляющих данное соединение. Общая величина местных сопротивлений ($R_{общ\ м}$) будет также равна сумме местных сопротивлений, присутствующих в вентиляционной сети, то есть

$$R_{общ\ тр} = R_{тр1} + R_{тр2} + R_{тр3} + \dots + R_{трj}; \quad (5)$$

$$R_{общ\ м} = R_{м1} + R_{м2} + R_{м3} + \dots + R_{ми} \quad (6)$$

где j – количество горных выработок; i – количество местных сопротивлений.

Тогда, например, для одной горной выработки, имеющей два поворота на 90 и 45°, общая величина местного сопротивления (сумма величин местных сопротивлений по расчётному маршруту) будет равна

$$R_{общ\ м} = R_{м1} + R_{м2} = \xi_1 \frac{\gamma}{2 \cdot g \cdot S^2} + \xi_2 \frac{\gamma}{2 \cdot g \cdot S^2} = \frac{\gamma}{2 \cdot g \cdot S^2} (\xi_1 + \xi_2). \quad (7)$$

То есть при последовательном соединении общее местное сопротивление при одном сечении горных выработок будет равно сумме коэффициентов местного сопротивления.

Используя общее представление о соотношении сопротивлений, можно вывести следующую зависимость:

$$\frac{R_{общ\ м}}{R_{общ\ тр}} = \frac{\xi \cdot \gamma}{\alpha \cdot \frac{L \cdot P}{S^3}} = \frac{\xi \cdot \gamma \cdot S}{2 \cdot g \cdot \alpha \cdot L \cdot P} \leq 0,1 \quad (8)$$

Если учесть, что коэффициент аэродинамического сопротивления трения равен [10]

$$\alpha = \frac{\beta \cdot \gamma}{2 \cdot g} \quad (9)$$

то

$$\frac{R_{общ\ м}}{R_{общ\ тр}} = \frac{\xi \cdot S}{\beta \cdot L \cdot P} \leq 0,1, \quad (10)$$

где β – безразмерный коэффициент, учитывающий шероховатость горных выработок.

По зависимости (8) построены графики, представленные

на рис. 3, анализируя их, можно сделать целый ряд важных выводов.

Во-первых, только при определенных длинах горных выработок соблюдается условие (1). Например, если вентиляционная сеть состоит из одной протяженной горной выработки с двумя поворотами на 80° (т.е. по рис. 1 $\xi_{80^\circ} = 1$, а общий $\xi_{общ} = \xi_{80^\circ} + \xi_{80^\circ} = 2$), то соотношение (1) будет выполняться только при длине выработки более 1100 м. Следовательно, если длина будет меньше, то и влияние местных сопротивлений будет больше. Например, при длине 200 м общая доля местных сопротивлений в общешахтном составит 50%.

Во-вторых, как видно из графиков, при увеличении площади сечения горной выработки (12, 18 и 24 м²) влияние местных сопротивлений на значение общешахтного аэродинамического сопротивления растет. Это подтверждается актуальностью выполненных работ другими авторами для рудников [4–7].

В-третьих, на соотношение (10) влияют только параметры горной выработки и значения двух безразмерных эмпирических коэффициентов (ξ и β). При этом периметр и площадь сечения между собой связаны через форму горной выработки.

Скорость движения воздуха не влияет на соотношение (1). Она одинаково влияет на затрачиваемую депрессию как на преодоление местного сопротивления, так и сопротивления трения.

Безусловно, нами рассмотрена простая последовательная схема соединения горных выработок. На практике такие могут встречаться, например, при строительстве тоннелей. Но данный пример весьма наглядно демонстрирует возможные соотношения двух видов аэродинамических сопротивлений. Более сложные виды соединений горных выработок могут дать другое соотношение. В данном направлении работа продолжается.

В настоящее время появились новые технические средства для проведения исследований. Это и специализированное программное обеспечение, позволяющее создавать виртуальные аналоги [9], это и новые средства мониторинга и измерения параметров рудничной атмосферы. Также требуют отдельного рассмотрения вопросы, связанные с влиянием старения горных выработок на отношение величин местных сопротивлений к величине аэродинамического сопротивления трения [10] и влияния топологии шахтной вентиляционной сети [11; 12].

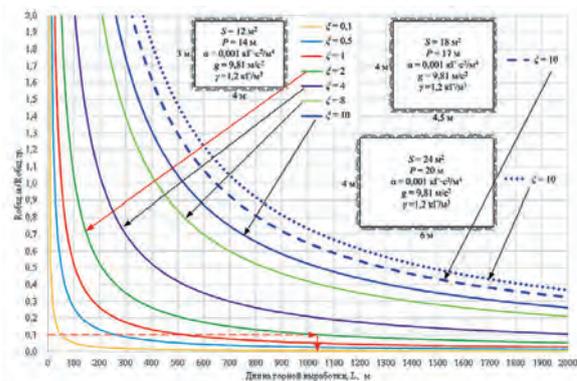


Рис. 3
Графики зависимости соотношения сопротивлений от общей протяженности последовательно соединённых горных выработок

Fig. 3
Dependence diagrams of resistance ratio to the total length of consecutively connected mine workings

Заключение

Проведенные аналитические и лабораторные эксперименты показывают актуальность продолжения исследований местных сопротивлений с целью учета их результатов при проектировании вентиляции горных предприятий. В настоящее время повышение уровня аэрологической безопасности требует пересмотра всех ранее введенных допущений.

Сегодня сечения горных выработок угольных шахт менее

12 м² встречаются редко. Скорости движения воздуха выросли в несколько раз по сравнению со значениями 1940–1960 гг., когда были проведены основные исследования по влиянию местных сопротивлений для угольных шахт.

Следовательно, необходимо проводить новые исследования по влиянию местных сопротивлений на угольных шахтах. Использование подхода, при котором $R_m \leq 0,1 \cdot R_{\text{пр}}$, не всегда верно.

Список литературы / References

1. Ушаков К.З. (ред.). *Рудничная вентиляция: Справочник*. М.: Недра; 1977. 328 с.
2. Харев А.А. *Методы подсчета местных вентиляционных сопротивлений в шахтных сетях и способы снижения их*. дис. ... канд. техн. наук. М.; 1949. 34 с.
3. Ксенофонтова А.И. *Депрессионные съемки на шахтах*. М., Ленинград: ОНТИ. Глав. ред. горно-топливной и геол.-развед. лит-ры; 1938. 76 с.
4. Веденеева Л.М. *Исследование аэродинамических процессов в местных сопротивлениях и их влияния на воздухораспределение в вентиляционных сетях с большим эквивалентным отверстием: автореф.* ... канд. техн. наук. Пермь; 1995. 18 с.
5. Семин М.А. *Обоснование параметров систем вентиляции рудников в реверсивных режимах проветривания: дис.* ... канд. техн. наук. Пермь; 2016. 151 с.
6. Левин Л.Ю., Семин М.А., Ключкин Ю.А. Расчет местных аэродинамических сопротивлений в моделях вентиляционных сетей шахт и рудников. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2018;(3):265–278. Levin L.Yu., Semin M.A., Klyukin Yu.A. Analysis of methods for calculating shock losses in mine ventilation networks. *Izvestiya Tulkogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2018;(3):265–278. (In Russ.)
7. Левин Л.Ю., Зайцев А.В. Современные тенденции в области исследования местных аэродинамических сопротивлений в рудничных вентиляционных сетях. *Научные исследования и инновации*. 2010;4(2):55–58. Levin L.Yu., Zaitsev A.V. Current trends in studying local aerodynamic resistances in mine ventilation systems. *Nauchnye Issledovaniya i Innovatsii*. 2010;4(2):55–58. (In Russ.)
8. Кобылкин С.С., Каледин О.С., Кобылкин А.С., Дядин С.А. Оценка влияния местных сопротивлений на общее аэродинамическое сопротивление воздухопроводов. В кн.: *Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 110-летию горного факультета, г. Санкт-Петербург, 28–29 окт. 2015 г.* СПб.: Санкт-Петербургский горный университет; 2015. С. 91–92.
9. Кобылкин С.С., Тимченко А.Н., Кобылкин А.С. Применение компьютерного моделирования при выборе параметров работы пылеотсоса, встраиваемого в проходческие комбайны. *Безопасность труда в промышленности*. 2021;(3):21–27. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2021-3-21-27> Kobylkin S.S., Timchenko A.N., Kobylkin A.S. Use of computer simulation in the selection of operating parameters for the dust extractor built into the road headers. *Occupational Safety in Industry*. 2021;(3):21–27. (In Russ.) <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2021-3-21-27>
10. Ушаков В.К., Скопинцева О.В. Аэродинамическое старение горных выработок и учет его влияния на надежность вентиляции. В кн.: *Интенсивная и безотходная технология разработки угольных и сланцевых месторождений: тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф.* М.: МГИ; 1989. С. 116–117.
11. Ушаков В.К. Алгоритм выявления ветвей-диагоналей в шахтных вентиляционных системах для обеспечения безопасности труда. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(12):147–155. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-12-0-147-155> Ushakov V.K. Identification algorithm of diagonal branches in mine ventilation systems for higher safety in operation. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(12):147–155. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-12-0-147-155>
12. Ушаков В.К. Метод выбора рациональной тактики восстановления работоспособности шахтных вентиляционных систем. *Горная промышленность*. 2023;(5):114–118. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5-114-118> Ushakov V.K. A method for selecting a rational approach to restoring the performance of mine ventilation systems. *Russian Mining Industry*. 2023;(5):114–118. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5-114-118>

Информация об авторах

Кобылкин Сергей Сергеевич – доктор технических наук, профессор, кафедра безопасности и экологии горного производства, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва Российская Федерация; e-mail: kobylkin.s@misis.ru

Ушаков Владимир Кимович – доктор технических наук, профессор, кафедра математики, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: vk.usakov@misis.ru

Кузнецов Иван Ильич – горный инженер, аспирант, кафедра безопасности и экологии горного производства, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва Российская Федерация

Информация о статье

Поступила в редакцию: 21.02.2024

Поступила после рецензирования: 12.03.2024

Принята к публикации: 12.03.2024

Information about the authors

Sergei S. Kobylkin – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Mine Safety and Environment, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; e-mail: kobylkin.s@misis.ru

Vladimir K. Ushakov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor at the Department of Mathematics, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; e-mail: vk.usakov@misis.ru

Ivan I. Kuznetsov – Mining Engineer, Postgraduate Student, Department of Mine Safety and Environment, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

Article info

Received: 21.02.2024

Revised: 12.03.2024

Accepted: 12.03.2024