

Обновленная классификация аэродинамических сопротивлений горных предприятий

С.С. Кобылкин✉, Д.А. Федоров, И.И. Кузнецов

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

Резюме: Проветривание шахт и рудников основное мероприятие по обеспечению промышленной безопасности. В настоящее время существуют проблемы с методической базой по проектированию вентиляции. Для разработки документов по проведению расчётов проветривания требуются дополнительные исследования в части определения и учета аэродинамического сопротивления горных выработок. Предложена обновленная классификация аэродинамических сопротивлений с учетом возможностей существующих приборов контроля параметров рудничной атмосферы. Актуализированы сведения по лобовым аэродинамическим сопротивлениям для горных предприятий. В частности, предложено к лобовым сопротивлениям относить только те, что возникают вследствие движения объекта (например, самоходной горной техники). Препятствия в виде рудничных стоек, стационарного горного оборудования, различных материалов, расположенные в горной выработке длиной не более 19 м, будут относиться к местным сопротивлениям. В основе предлагаемой классификации лежит сформированное и устоявшееся в России научное мнение о существовании трех видов аэродинамического сопротивления. Уточнение классификации выполнено только в части того, что относить к каждому из трех видов сопротивлений.

Ключевые слова: рудник, шахта, вентиляция, аэродинамическое сопротивление, проектирование вентиляции, промышленная безопасность, лобовое сопротивление, местные сопротивления

Для цитирования: Кобылкин С.С., Федоров Д.А., Кузнецов И.И. Обновленная классификация аэродинамических сопротивлений горных предприятий. *Горная промышленность*. 2025;(4):92–96. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4-92-96>

New classification of mine ventilation resistance

S.S. Kobylikin✉, D.A. Fedorov, I.I. Kuznetsov

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

Abstract: Mine ventilation is the main measure to ensure industrial safety. Currently, there exist issues with the methodological basis for ventilation design. Additional research is required to determine and account for the aerodynamic resistance in mine workings in order to develop documents for ventilation calculations. An updated classification of aerodynamic resistance is proposed taking into account the technical capacity of devices used to monitor the mine air parameters. The paper revises information on frontal resistances in mines. In particular, it is proposed to categorize as the frontal resistance only those resistances that arise due to the movement of objects, e.g. mobile mining equipment. Obstacles such as the mine posts, stationary mining equipment, various materials placed in the mine workings with the length not exceeding 19 m will be referred to as the local resistances. The proposed classification is based on the existing scientific opinion on the presence of the three types of aerodynamic resistance, which is well-established in Russia. Elaboration of this classification is made only in terms of what should be referred to each of the three types of the resistance.

Keywords: mine, shaft, ventilation, air-flow resistance, ventilation design, industrial safety, frontal resistance, local resistance

For citation: Kobylikin S.S., Fedorov D.A., Kuznetsov I.I. New classification of mine ventilation resistance. *Russian Mining Industry*. 2025;(4):92–96. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4-92-96>

Введение

Вопросы обеспечения безопасности на горных предприятиях являются приоритетными. Наиболее острый вопрос связан с эффективным проветриванием. В настоящее время нет действующего документа по проектированию вентиляции угольных шахт и рудников. Существовавшее ранее Руководство по проектированию вентиляции шахт, утвержденное Минуглепром СССР от 15.08.1989 г., в настоящее время не действует. Ряд вопросов, касающихся определения

величины аэродинамического сопротивления, требует пересмотра. Существующие эмпирические коэффициенты, указанные в справочниках, не учитывают изменившиеся виды технологий, применяемые для проходки горных выработок, современные виды крепи и горное оборудование. Отдельно обращает на себя внимание вопрос определения и учета величины местного и лобового аэродинамического сопротивления. Данные виды сопротивлений при проектировании вентиляции шахт и рудников не учитываются.

В России выделяют три вида аэродинамических сопротивлений (трения, местные и лобовые). В зарубежных странах лобовое аэродинамическое сопротивление отнесено к местным аэродинамическим сопротивлениям [1; 2].

При проектировании вентиляции шахт и рудников учитывается только аэродинамическое сопротивление трения. Оно обусловлено трением движущегося воздуха о борта, почву и кровлю горных выработок. Исследованиям данного вида аэродинамических сопротивлений посвящено большое количество работ выдающихся ученых, таких как А.А. Скочинский, В.Б. Комаров, А.И. Ксенофонтова, П.И. Мустьель, В.В. Кашибадзе, А.А. Харев и др. В настоящее время требуется пересмотр существующих справочников по рудничной вентиляции в части представленных там значений коэффициентов аэродинамического сопротивления трения для горных выработок большого сечения – более 20 м². А для учета местных и лобовых аэродинамических сопротивлений требуется обновить существующую классификацию.

Местные аэродинамические сопротивления

Исследованиями местных аэродинамических сопротивлений активно занимаются в настоящее время [2–10]. Получены зависимости для некоторых видов соединений горных выработок. Однако они практически никак не учитываются при проектировании вентиляции шахт и рудников. По мнению некоторых авторов, их общешахтная величина может достигать до 20% [2–7], а по некоторым данным – до 50% [8] от общей величины аэродинамического сопротивления трения в зависимости от схемы проветривания. В Руководстве по проектированию вентиляции угольных шахт рекомендуется принимать во внимание, что величина общего шахтного аэродинамического сопротивления, обусловленного местными потерями, принимается равной 10% от общего аэродинамического сопротивления трения, однако в работе [9] данное решение подвергается сомнению.

На основе проведенного анализа вентиляционных планов всех шахт России был выявлен ряд местных сопротивлений, которые ранее не учитывались в исследованиях

[10]. В результате проделанной работы была разработана отдельная классификация всех встречающихся местных сопротивлений, образующихся при сопряжении горных выработок:

1. Примыкающая тупиковая горная выработка.
2. Т-образное сопряжение горных выработок.
3. Сопряжение четырех горных выработок.
4. Сопряжение трех горных выработок с одной тупиковой.
5. Сопряжение двух горных выработок с двумя тупиковыми.
6. Сопряжение пяти горных выработок.
7. Сопряжение четырех горных выработок с одной тупиковой.
8. Сопряжение трех горных выработок с двумя тупиковыми.
9. Сопряжение двух горных выработок с тремя тупиковыми.

При этом в данной части общей классификации рассматриваются для всех случаев наличие тупиковых горных выработок, наличие в примыкающих горных выработках вентиляционных сооружений, направление воздушного потока, утечки и подсосы.

Лобовые аэродинамические сопротивления

Лобовые аэродинамические сопротивления изучены в меньшей степени. Большинство исследовательских работ были проведены в 1940–1960 гг. такими учеными, как А.А. Скочинский, А.И. Ксенофонтова, В.В. Кашибадзе, А.А. Харев, И.Е. Идельчик и др.

При проектировании горного предприятия выбор площади сечения горных выработок обусловлен обеспечением заданной производительности предприятия и типом применяемого на нем горного оборудования. Перекрытие сечения горной выработки самоходным горным оборудованием (СГО) может достигать 60%.

В настоящее время под лобовыми аэродинамическими сопротивлениями принято понимать сопротивление, оказываемое потоку находящимся в нем телом. К ним относят:

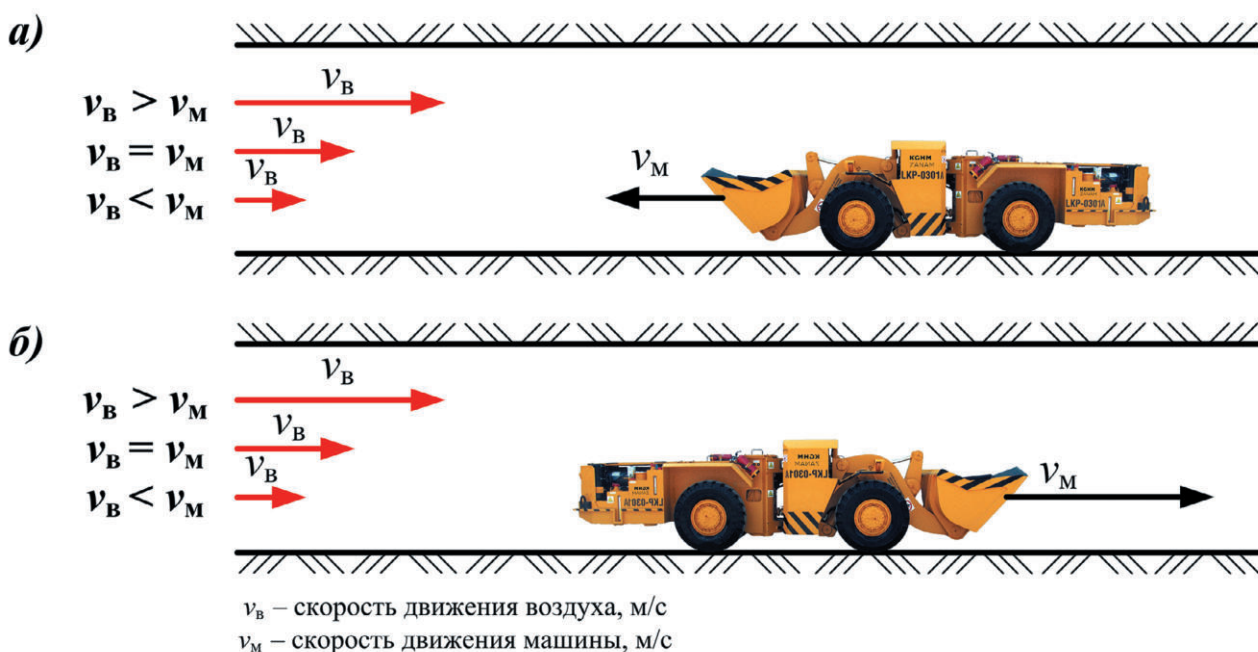


Рис. 1
Схемы движения машин (СГО) относительно движения воздуха

Fig. 1
Patterns of equipment movement (mobile mining equipment) in relation to the air flow

расстрелы, рудничные стойки, вагонетки, горное оборудование (без указания типа этого оборудования). Ранее, до 1949 г., отдельно термин «лобовые сопротивления» не встречается. Впервые он появился в учебнике Рудничная вентиляция А.А. Скочинского и В.Б. Комарова.

В аэродинамике есть четкое определение термина «лобовое аэродинамическое сопротивление» – сила, препятствующая движению тел в жидкостях и газах. Здесь следует обратить внимание именно на то, что данный вид сопротивления возникает только при движении какого-либо тела или объекта. Лобовое аэродинамическое сопротивление трения рассматривается как состоящее из трех частей: 1) ударной волны, приходящейся на площадь объекта, перпендикулярную набегающему воздушному потоку; 2) аэродинамического сопротивления трения по поверхности объекта; 3) турбулентного сопротивления вихрей за объектом.

При движении СГО по выработкам могут быть различные сочетания направления движений машины и воздушной струи (рис. 1), которые по-разному будут влиять на общее аэродинамическое сопротивление в горной выработке. При встречном движении машины и воздушной струи (рис. 1, а) лобовое сопротивление увеличивается. Если скорость воздушной струи будет существенно меньше скорости движения СГО при условии наличия минимального светового проема, гипотетически возможно опрокидывание воздушной струи. При попутном движении СГО и воздушной струи (рис. 1, б) и при совпадении скоростей лобовое сопротивление будет минимизироваться. Также возможно в таких случаях наблюдать поршневой эффект (дополнительная тяга), что тоже может привести к изменению распределения воздуха в сети горных выработок.

Для оценки влияния лобового аэродинамического сопротивления на аэродинамику шахтных вентиляционных потоков и на распределение воздуха по сети горных выработок важно идентифицировать все источники данного вида аэродинамического сопротивления.

Обновленная классификация аэродинамических сопротивлений

Из анализа российских источников (учебников, справочников, монографий и диссертаций) можно сделать вывод, что под лобовым аэродинамическим сопротивлением принято понимать препятствия, которые можно условно разделить на три группы: распределенные (рудничные и гидростойки), локальные (горное оборудование) и самоходная горная техника (электровозы, шахтные самосвалы, порода-доставочные машины и т.п.).

Данный перечень не отражает всех возможных случаев, идет в противоречие с понятием лобового аэродинамического сопротивления из аэродинамики в авиа- и автостроении и не коррелируется с международными понятиями видов аэродинамических сопротивлений в горном деле. Для дальнейших исследований необходимо сделать классификацию аэродинамических сопротивлений и устранить противоречия.

В основе предлагаемой классификации лежит сформированное и устоявшееся в России научное мнение о существовании трех видов аэродинамических сопротивлений (трение, местные и лобовые аэродинамические сопротивления). Уточнение классификации будет только в части того, что относить к каждому из трех видов сопротивлений.

В настоящее время минимальный перепад давления, который можно измерить существующими приборами в рудничном исполнении (ММН-2400), равен $h_{ст} = 1$ Па. У при-

бора МБГО-2 погрешность измерения дифференциального давления равна $5 \pm 0,15p$ Па. Такой перепад давления можно измерить только на определенной длине ($L_{изм}$) и при определенной комбинации параметров (α , P , v и S) исходя из известной зависимости

$$L_{изм} = h_{ст} \cdot S / \alpha \cdot P \cdot v^2 = h_{ст} \cdot d / 4 \cdot \alpha \cdot v^2.$$

С учетом того что периметр P , м, и площадь сечения S , м², горной выработки связаны через гидравлический диаметр d , м, можно сделать следующий вывод: длина участка $L_{изм}$, на котором можно измерить депрессию в 1 Па, будет при минимальных значениях гидравлического диаметра горной выработки d , м, и скорости движения воздуха v , м/с, а также при наибольшем значении коэффициента аэродинамического сопротивления трения α , кгс·с²/м⁴.

Минимальный гидравлический диаметр горной выработки может быть принят 1 м, что соответствует вентиляционной скважине или вентиляционному восстающему круглой формы с диаметром в 1 м, а также горной выработке квадратной формы с длиной сторон равной 1 м. Максимальное значение коэффициента аэродинамического сопротивления трения можно выбрать из Справочника рудничной вентиляции (под ред. К.З. Ушакова, 1987) ($\alpha = 0,13$ кгс·с²/м⁴). Минимальная скорость движения воздуха обусловлена требованиями Федеральных норм и правил и равна $v = 0,1$ м/с (для угольных шахт). Тогда

$$L_{изм} = 0,1 \cdot 1 / 4 \cdot 0,13 \cdot 0,1^2 = 19 \text{ м.}$$

Этот расчёт используется в качестве некоторого критерия ($L_{изм} = 19$ м), по которому можно определить, что относится к аэродинамическому сопротивлению трения, а что – к местному аэродинамическому сопротивлению.

Помимо относящихся к аэродинамическому сопротивлению трения крепи, конвейера и трапа, к данному виду аэродинамического сопротивления можно отнести:

- рудничные стойки, если их установлено несколько подряд на участке длиной более 19 м;
- стационарное оборудование с общей длиной более 19 м.

Для вышеуказанных случаев возможно провести измерения перепада давления и определить коэффициент аэродинамического сопротивления трения такого участка. Данные участки при проектировании вентиляции будут рассматриваться как отдельные ветви.

Всё, что расположено на участке горных выработок протяженностью менее 19 м, будет относиться к местным аэродинамическим сопротивлениям. В проектировании такие участки будут учитываться как дополнительное сопротивление (по аналогии с местными аэродинамическими сопротивлениями вентиляционных окон или дверей).

Отдельно к местным аэродинамическим сопротивлениям относятся проходческие комбайны. Являясь СГО, они расположены всегда в определенном месте – в призабойной части горной выработки. Воздушная струя их омывает по касательной, не ударяясь в «лоб». При этом данный вид аэродинамического сопротивления не оказывает существенного влияния на общешахтное сопротивление и распределение воздушных потоков по вентиляционной сети.

К лобовым аэродинамическим сопротивлениям будут относиться только движущиеся объекты, так, как это понимается в других науках, где изучается аэродинамика движущихся тел (машин, самолетов, ракет, поездов и т.д.).

В классификации аэродинамических сопротивлений в рудничной аэрологии к лобовому аэродинамическому сопротивлению будем относить СГО, клеть / скип и людей.

Таблица 1
Классификация аэродинамических сопротивлений

Table 1
Classification of aerodynamic resistances

Аэродинамическое сопротивление трения, $R_{тр.}$, кц	Шероховатость бортов, кровли и почвы горных выработок		$R_{тр.} = \alpha \cdot P \cdot L / S^3$ P – периметр горной выработки, м; S – площадь сечения горной выработки, м ² ; L – длина горной выработки, м; α – коэффициент аэродинамического сопротивления трения, кгс·с ² /м ⁴ .	$h_{ст.} = R_{тр.} \cdot Q^3$ $h_{ст.}$ – депрессия горной выработки, необходимая для преодоления сопротивления трения, кг/м ² (даПа); Q – количество воздуха, проходящее по горной выработке, м ³ /с.
	Равномерно распределенная крепь на участке длиной $l \geq 19$ м			
	Конвейерная лента			
	Трап, ж/д пути			
	Стационарное горное оборудование, энергопоезд, трансформаторы, склад материалов при $l \geq 19$ м			
	Рудничные стойки / растреллы на участке $l \geq 19$ м			
Аэродинамическое местное сопротивление, $R_{м.}$, кц	Поворот горной выработки		$R_{м.} = \xi \cdot \gamma / 2 \cdot g \cdot S^2$ γ – удельный вес воздуха, кг/м ³ , при нормальных условиях $\gamma = 1,2$ кг/м ³ ; g – ускорение силы тяжести, м/с ² , при нормальных условиях $g = 9,807$ м/с ² ; S – площадь сечения горной выработки за местным сопротивлением, м ² ; ξ – коэффициент аэродинамического сопротивления трения, безразмерная величина.	$h_{м.} = \xi \cdot \gamma \cdot v^2 / 2 \cdot g$ $h_{м.}$ – депрессия горной выработки, необходимая для преодоления местного сопротивления, кг/м ² (даПа); v – скорость движения воздуха в горной выработке, м/с.
	Расширение / сужение горной выработки			
	Соединение / разделение горных выработок			
	Вентиляционная дверь (окно), парус			
	Кроссинг			
	Прходческий комбайн			
	Рудничные стойки на участке $l < 19$ м			
	Стационарное горное оборудование, трансформаторы, склад материалов при $l < 19$ м			
Аэродинамическое лобовое сопротивление, $R_{л.}$, кц	Движущееся горное оборудование	Протяженное СГО ширина ~ высота << длина (электровоз, монорельс и т.п.)	$R_{л.} = c \cdot S_{м.} \cdot \gamma / 2 \cdot g \cdot (S - S_{м.})^3$ γ – удельный вес воздуха, кг/м ³ , при нормальных условиях $\gamma = 1,2$ кг/м ³ ; g – ускорение силы тяжести, м/с ² , при нормальных условиях $g = 9,807$ м/с ² ; S – площадь сечения горной выработки в месте расположения объекта, м ² ; $S_{м.}$ – минимальное сечение, наибольшее сечение тела в плоскости перпендикулярной потоку, м ² ; c – коэффициент лобового сопротивления трения, безразмерная величина.	$h_{л.} = c \cdot S_{м.} \cdot \gamma \cdot v^2 / 2 \cdot g \cdot (S - S_{м.})$ $h_{л.}$ – депрессия горной выработки, необходимая для преодоления лобового сопротивления, кг/м ² (даПа).
		СГО ширина ~ высота ~ длина (ПДМ, ШАС, буровая установка и т.п.)		
		Клеть/скип		
		Комбайн очистной		
	Человек	Группа людей		
		Один человек		

При этом с учетом влияния конструкции горного оборудования на аэродинамическое сопротивление трения о поверхность СГО можно разделить на два подвида:

- 1) СГО, у которого длина, высота и ширина сопоставимы (например, ПДМ, ШАС, буровые установки и т.п.);
- 2) СГО, у которого большая протяженность (электровозы и монорельсовый транспорт).

Данные предложения по классификации аэродинамических сопротивлений представлены в табл. 1.

Заключение

Одной из проблем в области обеспечения безопасности и эффективности ведения горных работ является плохо организованное проветривание.

Аварии и инциденты происходят из-за недостаточной проработанности проектов по проветриванию горных предприятий, а также нарушений требований нормативных документов. В настоящее время отсутствуют нормативные документы по проектированию вентиляции горных предприятий. Ранее действующие документы по расчёту проветривания также не учитывают ряд факторов, например, лобовые аэродинамические сопротивления. Как показал анализ научных работ, данный вид аэродинамического сопротивления недостаточно изучен.

При этом к лобовым аэродинамическим сопротивлениям в рудничной аэрологии относят, как правило, не только движущуюся горную технику (обычно указывают только вагонетки, ПДМ, ШАС, буровые машины и т.п.), а добавляют растреллы и рудничные стойки. В аэродинамике в других областях науки указывается, что лобовое аэродинамическое сопротивление возникает только у движущихся объектов (машины, самолеты, ракеты и т.д.).

В зарубежной литературе в области аэрологии горных предприятий нет понятия лобового аэродинамического сопротивления. Там их относят к местным аэродинамическим сопротивлениям.

Для всех дальнейших исследований предлагается разработанная классификация аэродинамических сопротивлений, в которой устранены все противоречия.

В основе предлагаемой классификации лежит сформированное и устоявшееся в России научное мнение о существовании трех видов аэродинамических сопротивлений (трение, местные и лобовые аэродинамические сопротивления). Уточнение классификации выполнено только в части того, что относить к каждому из трех видов сопротивлений.

Список литературы / References

1. Carlos S. *Mine Ventilation: A concise guide for students*. Springer Cham; 2020. 371 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-49803-0>
2. Pramod T. *Advanced mine ventilation: Respirable coal dust, combustible gas and mine fire control*. Woodhead Publishing; 2018. 528 p.

3. Газизуллин Р.Р., Левин Л.Ю., Зайцев А.В. Влияние местных сопротивлений на воздухораспределение в рудниках при реверсивном режиме работы главной вентиляторной установки. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2012;(5):227–230.
Gazizullin R.R., Levin L.Yu., Zaitsev A.V. Influence of local resistances on air distribution in mines with reversible operation of the main fan system. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2012;(5):227–230. (In Russ.)
4. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Стукалов В.А. Моделирование аэродинамических сопротивлений сопряжений горных выработок. *Горный журнал*. 2009;(12):56–58. Режим доступа: <https://www.rudmet.ru/journal/562/article/6341/> (дата обращения: 09.03.2025).
Kazakov B.P., Shalimov A.V., Stukalov V.A. Simulation of aerodynamic drag of interfaces of mines. *Gornyi Zhurnal*. 2009;(12):56–58. (In Russ.) Available at: <https://www.rudmet.ru/journal/562/article/6341/> (accessed: 09.03.2025).
5. Левин Л.Ю., Семин М.А., Газизуллин Р.Р. Разработка метода расчета местных аэродинамических сопротивлений при решении сетевых задач воздухораспределения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2014;(9):200–205. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2014/09/31_200-205_Levin.pdf (дата обращения: 09.03.2025).
Levin L.Yu., Semin M.A., Gazizullin R.R. Development of local resistance determination method for mine ventilation networks. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2014;(9):200–205. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2014/09/31_200-205_Levin.pdf (accessed: 09.03.2025).
6. Левин Л.Ю., Семин М.А., Зайцев А.В. Определение перепада давления на сопряжении вентиляционного ствола и канала ГВУ. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;(S7):93–104.
Levin L.Yu., Semin M.A., Zaitsev A.V. Determination of upcast shaft and fan drift junction pressure drop. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015;(S7):93–104. (In Russ.)
7. Левин Л.Ю., Мальцев С.В., Семин М.А., Колесов Е.В. Расчет аэродинамического сопротивления проектируемых шахтных стволов с использованием методов вычислительной гидродинамики. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(5):100–117. Режим доступа: <https://giab-online.ru/catalog/raschet-aerodinamicheskogo-soprotivleniya-proektiruemyh-shahtnyh> (дата обращения: 09.03.2025).
Levin L.Y., Maltsev S.V., Semin M.A., Kolesov E.V. Aerodynamic drag design for project mine shafts using methods of computational fluid dynamics. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(5):100–117. (In Russ.) Available at: <https://giab-online.ru/catalog/raschet-aerodinamicheskogo-soprotivleniya-proektiruemyh-shahtnyh> (accessed: 09.03.2025).
8. Кобылкин С.С., Каледин О.С., Дядин С.А., Кобылкин А.С. Оценка влияния местных сопротивлений на общее аэродинамическое сопротивление воздухопроводов. В кн.: *Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование: материалы Междунар. науч.-практ. конф., г. Санкт-Петербург, 28–29 окт. 2015 г.* СПб.: Санкт-Петербургский горный университет; 2015. С. 91–92.
9. 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>
Kobylkin 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>
10. Кузнецов И.И. Оценка влияния местных сопротивлений на общешахтное аэродинамическое сопротивление при реверсе. *Безопасность жизнедеятельности*. 2024;(5):49–56.
Kuznetsov I.I. Assessment of the influence of local resistance s on the overall aerodynamic drag during reverse. *Bezopasnost Zhiznedeyatelnosti*. 2024;(5):49–56.

Информация об авторах

Кобылкин Сергей Сергеевич – доктор технических наук, профессор, кафедра безопасности и экологии горного производства Горного института, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-2626-208X>; e-mail: kobylkin.s@misis.ru

Федоров Денис Анатольевич – аспирант кафедры безопасности и экологии горного производства Горного института, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация

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

Информация о статье

Поступила в редакцию: 17.05.2025

Поступила после рецензирования: 10.06.2025

Принята к публикации: 18.06.2025

Information about the authors

Sergey S. Kobylkin – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Mine Safety and Environment, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-2626-208X>; e-mail: kobylkin.s@misis.ru

Denis A. Fedorov – Postgraduate Student, Department of Mine Safety and Environment, National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation

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: 17.05.2025

Revised: 10.06.2025

Accepted: 18.06.2025