

**УДК 622.45**

Морин Андрей Степанович, зав. каф., д.т.н., доцент (СФУ, г. Красноярск)  
Morin Andrey Stepanovich, Head of the Department, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor (SFU, Krasnoyarsk)

Сапожников Сергей Сергеевич, аспирант (СФУ, г. Красноярск)  
Sapozhnikov Sergey Sergeevich, postgraduate student (SFU, Krasnoyarsk)

**ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
В УСТЬЕ ШАХТНОГО СТВОЛА**

**STUDY OF AERODYNAMIC PROCESSES AT THE MOUTH OF  
A MINE SHAFT**

**Аннотация:** Представлены результаты физического моделирования аэродинамических процессов в устье шахтных стволов. Предложены технические решения по уменьшению поверхностных утечек воздуха через устье воздухоподающего ствола при нагнетательном способе искусственного проветривания подземных рудников и шахт.

**Abstract:** The results of physical modeling of aerodynamic processes at the mouth of mine shafts are presented. Technical solutions are proposed to reduce surface air leaks through the mouth of the air-supply shaft during the injection method of artificial ventilation of underground mines and shafts.

Работа современных горнодобывающих предприятий связана с потреблением большого количества электрической энергии. При разработке месторождений полезных ископаемых подземным способом до 50% общего расхода электроэнергии предприятия приходится на обеспечение общеобменной вентиляции [1]. При этом поверхностные утечки и подсосы воздуха через устье шахтных стволов приводят к непродуктивным затратам энергии, на долю которых может приходиться до 60% энергопотребления вентиляционного комплекса [2, 3]. Для изыскания наиболее перспективных направлений уменьшения величины поверхностных утечек и подсосов воздуха сотрудники СФУ провели экспериментальные исследования, связанные с изучением аэродинамических процессов, протекающих в устье шахтных стволов. Для решения поставленных задач были созданы две физические модели шахтной вентиляционной системы.

Первая физическая модель (рис. 1) была выполнена в масштабе  $M_L = 77:1$  ( $M_L$  – коэффициент пропорциональности линейных размеров натурного объекта и модели) [4]. В качестве рабочей жидкости использовался воздух.

Для корректного воспроизведения аэродинамических процессов в лабораторных условиях соблюдались условия кинематического и дина-

мического подобия. В качестве критерия подобия было выбрано число Фруда Fr [1]:

$$Fr = u_h^2 / (g \cdot D_h) = u_m^2 / (g \cdot D_m), \quad (1)$$

где  $u$  – средняя скорость воздушного потока в вентиляционном окне м/с;  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения;  $D$  – эквивалентный диаметр вентиляционного окна, м [5].

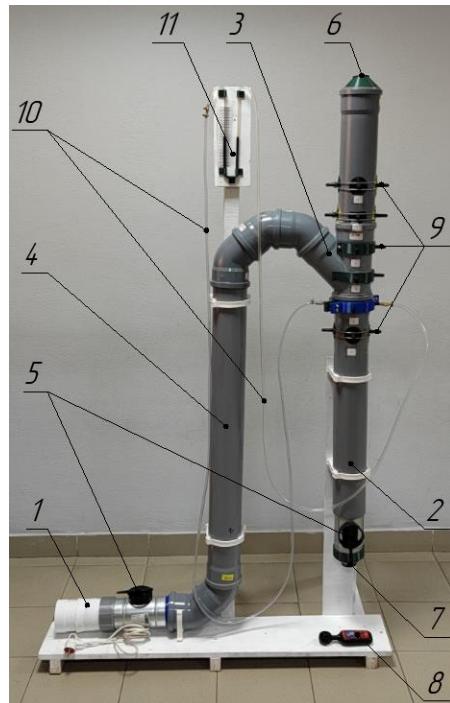


Рис. 1. Физическая модель шахтной вентиляционной установки с использованием воздушной рабочей среды:

1 – двухступенчатый осевой вентилятор; 2 – вертикальный ствол; 3 – вентиляционный канал; 4 – промежуточный воздуховод; 5 – поворотные шиберы; 6 – верхнее выпускное отверстие; 7 – нижнее выпускное отверстие; 8 – переносной анемометр; 9 – патрубки с наружной резьбой; 10 – присоединительные шланги; 11 – U-образный водяной пьезометр

В качестве основного фактора, оказывавшего влияние на утечки через устье ствола 2, была принята к рассмотрению средняя скорость воздушного потока в вентиляционном окне  $u_h$ :

$$u_h = \sqrt{u_m^2 \cdot D_h / D_m}, \text{ м/с} \quad (2)$$

где  $u_m$  – средняя скорость воздушного потока в вентиляционном окне модели м/с;  $D_h$ ,  $D_m$  – эквивалентный диаметр вентиляционного окна натурного объекта и модели соответственно, м.

Движение воздуха в модели обеспечивалось с помощью осевого вентилятора 1, сопряженного с вертикальным стволом 2 через наклонный венти-

ляционный канал 3 с прямоугольным окном. При изменении способа проветривания вентилятор разворачивали на 180°. Для более удобной компоновки модели канал 3 соединялся со стволовом 2 через промежуточный воздуховод 4.

Для ступенчатого изменения фактора  $u_h$  соответствующим образом изменяли скорость воздушного потока в вентиляционном окне модели  $u_m$  с помощью поворотных шиберов 5. При этом измеряли скорости движения воздуха  $u_6$  и  $u_7$  в отверстиях 6 и 7 с помощью переносного анемометра 8, после чего определяли скорость  $u_m$  по формуле

$$u_m = (Q_{ш} + Q_y) / (b \cdot h), \text{ м/с}, \quad (3)$$

где  $Q_{ш} = \pi \cdot D_7^2 \cdot u_7 / 4$  – расход воздуха, поступающего в шахту, м<sup>3</sup>/с (здесь  $D_7$  – диаметр нижнего отверстия 7, м;  $u_7$  – скорость истечения воздуха из отверстия 7, м/с);  $Q_y = \pi \cdot D_6^2 \cdot u_6 / 4$  – утечки воздуха, через устье ствола, м<sup>3</sup>/с (здесь  $D_6$  – диаметр верхнего отверстия 6, м;  $u_6$  – скорость истечения воздуха из отверстия 6, м/с);  $b$  и  $h$  – ширина и высота вентиляционного окна канала 3, м.

В стенке ствола 2 были предусмотрены 22 сквозных отверстия, снабженных патрубками 9. Для измерения пьезометрического давления внутри ствола в мм вод. ст. данные патрубки поочередно присоединяли шлангами 10 к U-образному жидкостному пьезометру 11.

На представленной физической модели были зафиксированы следующие особенности распределения воздушных потоков в устье вертикального шахтного ствола при нагнетательном режиме работы главной вентиляторной установки (ГВУ): при  $u_h = 3,75 \div 6,25$  м/с наиболее скоростные участки движения располагаются вдоль линии короткого тока, при  $u_h = 8,75 \div 11,25$  м/с – вдоль линий длинного тока и при  $u_h = 13,75 \div 16,25$  м/с – вдоль продольной оси ствола.

При работе ГВУ во всасывающем режиме поля вакуумметрического давления распределяются по сечению ствола менее контрастно, за исключением активной зоны всасывания, прилегающей к вентиляционному окну.

На основании проведенного обзора современной технической литературы и результатов, полученных на физической модели (рис. 1), было предложено снижать поверхностные утечки воздуха при нагнетательном способе вентиляции подземных рудников и шахт путём повышения аэродинамического сопротивления устья ствола с помощью инерционных воздушных вихрей. Одним из возможных технических решений данной задачи по предположению авторов является использование энергии исходящей струи ГВУ с помощью направляющих устройств, прикрепленных к внутренней стенке ствола.

Для опытного подтверждения эффективности сформулированного технического предложения взаимодействие воздушных потоков с направ-

ляющими устройствами в стволе были подробно изучены на следующей физической модели (рис. 2). Для простоты регулирования рабочих параметров модели воздушные потоки были заменены водяными. Коэффициент пропорциональности  $M_L$  линейных размеров натурного объекта и модели был принят равным 172:1. В качестве критерия кинематического и динамического подобия было использовано число Фруда, так как этот критерий не зависит от физико-механических свойств рабочей среды и позволяет получать корректные результаты при замене воздушной среды на водную. Измерение величины утечек через устье шахтного ствола осуществлялось следующим образом [6].

Подача воды из ёмкости 1 в вертикальный ствол 2 и горизонтальные выработки 3 через напорный трубопровод 4 и вентиляционный канал 5 обеспечивалась работой насосного агрегата 6. Режим работы насоса регулировали с помощью клапана 7, смонтированного на напорной линии.

Расход воздушного потока, задействованного в проветривании выработок 3, регистрировался путём замера объёма воды, подаваемой из ствола 8 в ёмкость 9 за время  $t$ , а величины поверхностных утечек – из ствола 2 в ёмкость 10 за тот же промежуток времени. Объём воды в ёмкостях 9 и 10 определялся с помощью мерного стакана 11, а суммарный расход воды – расходомера 12.

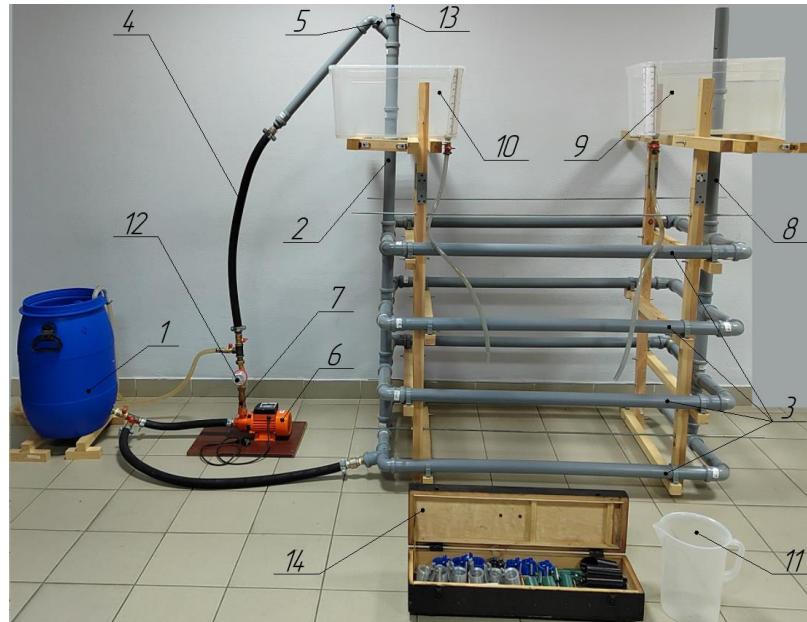


Рис. 2. Физическая модель вентиляционной системы для измерения величины утечек воздуха через устье вертикального шахтного ствола с использованием капельной жидкости:  
1 – водозаборная ёмкость; 2 – воздухоподающий ствол; 3 – горизонтальные выработки;  
4 – напорный трубопровод; 5 – вентиляционный канал; 6 – насосный агрегат; 7 – регулирующий клапан;  
8 – воздуховыдающий ствол; 9 – ёмкость для сбора полезного объёма воды;  
10 – ёмкость для сбора поверхностных утечек; 11 – мерный стакан; 12 – расходомер;  
13 – профилированная вставка в устье ствола; 14 – набор профилированных вставок, размещаемых в устье ствола

Первоначально в устье ствola 2 устанавливали изготовленную с помощью 3D-печати цилиндрическую вставку 13 с гладкой внутренней поверхностью. Полученные значения утечек соотносили с утечками в последующих опытах, проводимых с применением профилированных особым образом вставок 14. Всего было испытано 30 профилированных особым образом вставок.

Эффективность профилированных вставок, имитирующих направляющие пластины в устье шахтного ствола, оценивалась с помощью показателя утечек воздуха

$$\Psi_y = Q_{yi} / Q_{y0}, \quad (4)$$

где  $Q_{yi}$  – утечки воздуха через устье ствola в случае применения профилированной вставки с направляющими пластинами, размещёнными в соответствии со схемой №  $i$ ,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $Q_{y0}$  – утечки воздуха в случае применения гладкой цилиндрической вставки,  $\text{m}^3/\text{s}$ .

При проведении опытов была определена эффективность действия направляющих пластин различной формы, устанавливаемых на стенке ствola согласно следующим четырём основным схемам. Схемы № 1 и 2 применялись для направляющих устройств в виде полуколец, расположенных на линиях короткого (рис. 3, а) [7] и длинного (рис. 3, б) тока восходящего воздушного потока. Схемы № 3 и 4 основывались на применении кольцевых пластин [8], прикрепляемых к стенке ствola горизонтально (рис. 3, в) или наклонно (рис. 3, г).

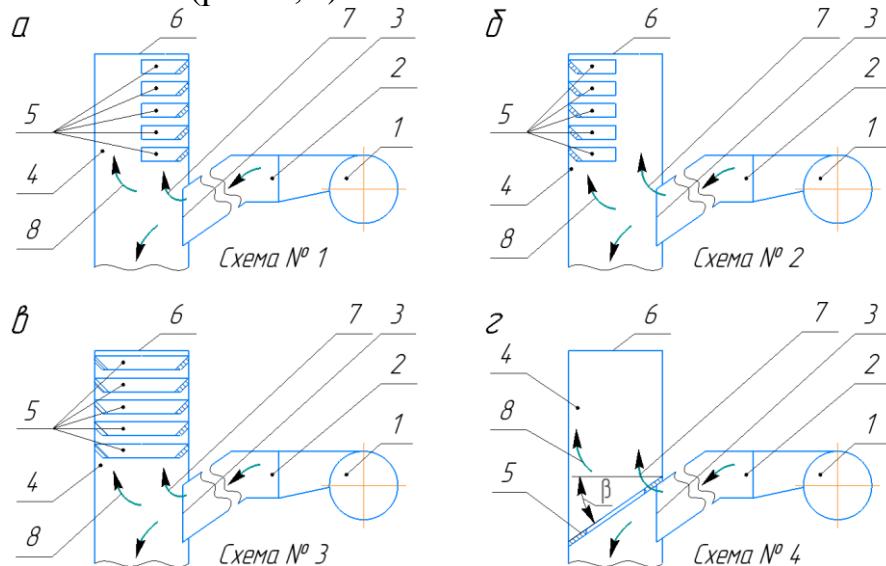


Рис. 3. Схемы размещения направляющих пластин в устье ствola:

1 – главная вентиляторная установка; 2 – вентиляционный канал; 3 – вентиляционное окно; 4 – вертикальный ствол; 5 – направляющие пластины; 6 –цилиндрическая вставка с профилированной внутренней поверхностью, изготовленная на 3D-принтере; 7 и 8 – линии короткого и длинного тока воздуха в устье ствola

В схемах № 1, 2 и 3 применялись пять пластин шириной 1 м с расстоянием между соседними горизонтальными уровнями их крепления 2,45 м, а также углом наклона к данным уровням  $45^0$ .

Особенностью схемы №4 является применение одной кольцевой пластины, расположенной в плоскости, проходящей через верхнюю границу вентиляционного окна параллельно оси исходящей из окна воздушной струи. Ширина пластины, как и в предыдущих случаях, составляла 1 м, а угол её наклона к плоскости крепления  $0^0$ .

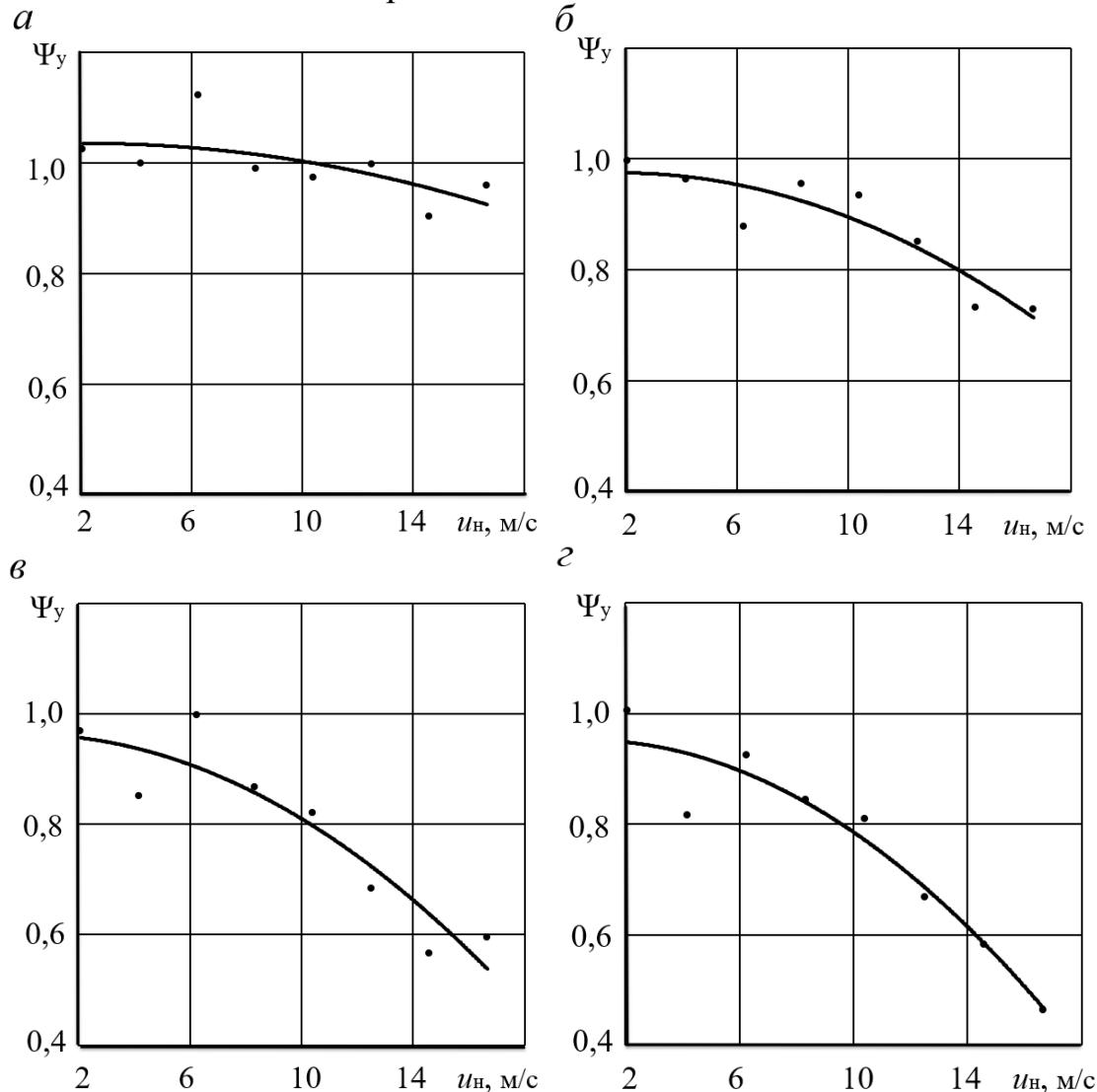


Рис. 4. Графики зависимости показателя утечек воздуха через устье ствола от средней скорости воздушного потока в вентиляционном окне:

*a* – при размещении направляющих пластин в стволе в соответствии со схемой № 1;  
*b* – в соответствии со схемой № 2; *c* – в соответствии со схемой № 3; *d* – в соответствии со схемой № 4

Аппроксимирующие кривые рассматриваемых зависимостей носят полиноминальный характер распределения показателя снижения утечек и имеют степень равную 2 [9]:

$$-\Psi_y = -0,0005 u_h^2 + 0,0023 u_h + 1,0326 \text{ (рис. 4, } a\text{)};$$

- $\Psi_y = -0,0012 u_h^2 + 0,0042 u_h + 0,9712$  (рис. 4, б);
- $\Psi_y = -0,0015 u_h^2 + 0,000005 u_h + 0,9629$  (рис. 4, в);
- $\Psi_y = -0,0019 u_h^2 + 0,0021 u_h + 0,9515$  (рис. 4, г).

Анализ представленных зависимостей показал, что наиболее эффективно располагать направляющие пластины в соответствии со схемой № 4 (рис. 3, г). В данном случае наблюдалось снижение показателя утечек  $\Psi_y$  в 1,5÷2 раза при скорости истечения воздушного потока из вентиляционного окна  $u_h = 3,75 \div 16,25$  м/с (рис. 4, г), а при предельно допустимом значении  $u_h = 15$  м/с утечки уменьшались на 45% [6].

Для более удобной интерпретации результатов, полученных на модели, были сформированы сводные графики зависимости показателей утечек от числа Фруда  $Fr$ . При преобразовании графиков  $\Psi_y - u_h$  (рис. 4) в графики  $\Psi_y - Fr$  (рис. 5) использовали уравнение  $Fr = u_h^2 / (g \cdot D_h)$ , полученное из формулы (1).

Эквивалентный диаметр вентиляционного окна прямоугольной формы рассчитывали по уравнению

$$D = 1,265 \cdot \sqrt[5]{b^3 \cdot h^3 / (b + h)}, \quad (5)$$

где  $b$  – ширина вентиляционного окна, м;  $h$  – высота вентиляционного окна, м.

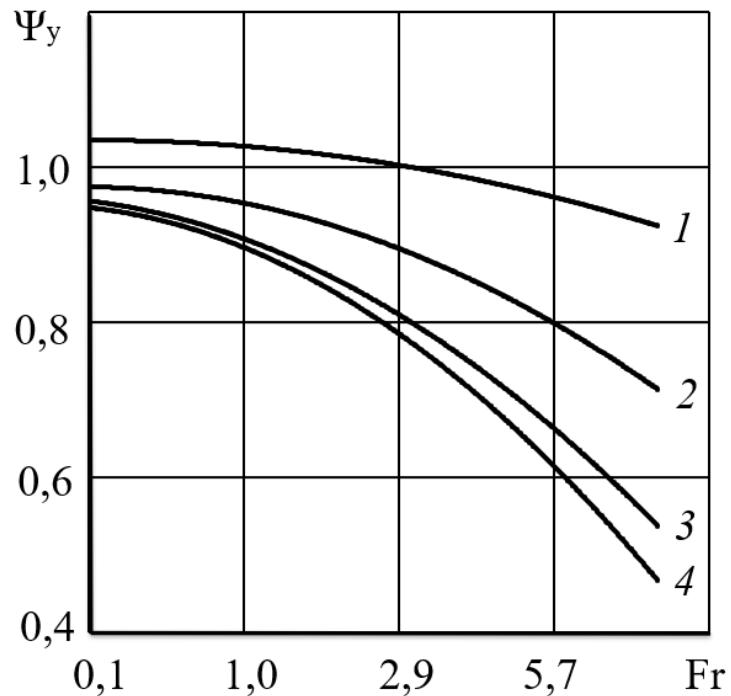


Рис. 5. Графики зависимости показателя утечек воздуха через устье ствола  $\Psi_y$  от числа Фруда  $Fr$ :

1 – при использовании направляющих пластин, размещаемых в стволе в соответствии со схемой № 1; 2 – в соответствии со схемой № 2; 3 – в соответствии со схемой № 3; 4 – в соответствии со схемой № 4

Проведенные исследования показали, что разработанные физические модели позволяют с требуемой достоверностью моделировать аэродинамические процессы в устье шахтных вентиляционных стволов при различных режимах работы вентиляционной системы. На основании полученных результатов были предложены технические решения, направленные на уменьшение поверхностных утечек при нагнетательном способе проветривания подземных горных выработок, и оценена эффективность их применения.

В рамках дальнейших изысканий по данной тематике необходимо проведение дополнительных исследований, направленных на поиск рациональных методов и средств снижения подсосов воздуха через устье ствола при работе ГВУ во всасывающем режиме.

### **Список литературы**

1. Морин А.С. Обоснование технологии трубопроводного проветривания глубоких карьеров: дис. ... докт. техн. наук: 25.00.22. – Красноярск: СФУ, 2011. – 211 с. eLIBRARY ID: 19262199. EDN: QFNJUB.
2. Михеев И.И., Косенков Е.Д., Белецкий Б.Ф. Пути повышения герметизации надшахтных зданий и сооружений : обзор. – М.: М-во угол. пром-ти СССР, ЦНИИ экономики и НТИ угол. пром-ти, 1971. – 56 с.
3. Каменских А.А. Разработка методов контроля и снижения поверхностных утечек воздуха на рудниках: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.20. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2011. – 143 с.
4. Сапожников С.С. Изучение полей давления в приуставной зоне шахтного ствола на физической модели / В сб.: Проспект Свободный – 2024. Ч. 2. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2024. – С. 352-355.
5. Калинушкин М.П. Вентиляторные установки. – М.: Высшая школа, 1962. – 294 с.
6. Сапожников С.С. Позиционные параметры направляющих пластин для снижения утечек воздуха через устье ствола шахты / В сб.: Проспект Свободный – 2024. Ч. 2. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2024. – С. 355-358.
7. Патент на изобретение № 2794147 E21 F 1/00 (РФ). Способ вентиляции подземных горных выработок / Морин А.С., Сапожников С.С. – № 2022121289; заявл. 03.08.2022; опубл. 12.04.2023. – Бюл. № 11. eLIBRARY ID: 53731448. EDN: SOMOML.
8. Патент на изобретение № 2819382 E21 F 1/00 (РФ). Способ проветривания подземных горных выработок / Морин А.С., Сапожников С.С., Плотников И.С., Марьясов Д.А. – № 2023128322; заявл. 02.11.2023; опубл. 20.05.2024. – Бюл. № 14. eLIBRARY ID: 67287183. EDN: BWXJVL.
9. Борисов Ф.И., Талдыкин Ю.А. Обработка опытных данных : методическое пособие. – Красноярск: Красноярская академия цветных металлов и золота [ГАЦМиЗ], 1998. – 79 с.