

ОБОСНОВАНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ СНИЖЕНИЯ УТЕЧЕК ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ УСТЬЕ ШАХТНОГО СТВОЛА

Морин А.С., Сапожников С.С., Анушенков А.Н., Касьянова Е.Н., Штреслер К.А.
Сибирский федеральный университет, Красноярск

Ключевые слова: подземные горные выработки, устье ствола, вентиляционное окно, нагнетательный и всасывающий способы проветривания, поверхностные утечки и притоки воздуха, поля статического давления, скорость потока, аэродинамическое сопротивление, направляющие пластины, воздушная завеса, наддув воздуха.

Аннотация. Дан обзор технических предложений по снижению поверхностных утечек воздуха через устье шахтного ствола при организации общеобменного проветривания подземных рудников и шахт. Рассчитана и изготовлена физическая модель шахтной вентиляционной системы. В процессе опытных работ на модели установлено, что при нагнетательном способе искусственного проветривания в верхней части ствола образуются весьма контрастные области повышенного и пониженного статического манометрического давления, местоположение которых может быть существенно изменено при регулировании режима работы главной вентиляторной установки, тогда как при всасывающем способе вентиляции горных выработок распределение статического вакуумметрического давления в стволе менее контрастно. Для повышения аэродинамического сопротивления устья ствола с целью уменьшения утечек или притоков воздуха, соответственно, при нагнетательном или всасывающем способах общеобменного проветривания предложено использование направляющих пластин, прикрепляемых к стенке ствола. Определена эффективность применения данных средств для нагнетательного способа при средней скорости воздушного потока в вентиляционном окне $3,75 \div 16,25$ м/с. Отмечено, что повышение аэродинамического сопротивления устья ствола за счёт преобразования энергии струи главного вентилятора с помощью направляющих пластин позволяет снижать утечки подаваемого в подземные горные выработки атмосферного воздуха на 45%. Показано, что для постановки аэродинамической завесы в устье ствола при всасывающем способе проветривания необходим рудничный вентилятор местного проветривания. Дана ориентировочная оценка эффективности его применения совместно с направляющей пластиной, размещаемой в пункте примыкания оси струи вентилятора к стенке ствола. Заявлено, что предложенный способ позволит уменьшить подсосы воздуха через устье стволов крупнейших подземных рудников и шахт в 3÷3,5 раза. Обозначены перспективы дальнейшего развития данных исследований.

JUSTIFICATION OF ENERGY-SAVING METHODS AND MEANS OF REDUCING AIR LEAKS THROUGH THE MOUTH OF A MINE SHAFT

Morin A.S., Sapozhnikov S.S., Anushenkov A.N., Kasyanova E.N., Stresler K.A.
Siberian Federal University, Krasnoyarsk

Keywords: underground mining, shaft mouth, ventilation window, injection and suction ventilation methods, surface leaks and air inflows, static pressure fields, flow velocity, aerodynamic drag, guide plates, air curtain, air pressurization.

Abstract. An overview of technical proposals for reducing surface air leaks through the mouth of a mine shaft in the organization of general exchange ventilation of underground mines and mines is given. A physical model of the shaft ventilation system has been calculated and manufactured. In the course of experimental work on the model, it was found that with the injection method of artificial ventilation, very contrasting areas of increased and decreased static manometric pressure are formed in the upper part of the trunk, the location of which can be significantly changed when adjusting the operating mode of the main fan unit, whereas with the suction method of ventilation of mine workings, the distribution of static vacuum pressure in the trunk is less contrasting. To increase the aerodynamic resistance of the trunk mouth in order to reduce leaks or air inflows, respectively, with injection or suction methods of general exchange ventilation, the use of guide plates attached to the trunk wall is proposed. The effectiveness of the use of these means for the injection method was determined at an average air flow velocity in the ventilation window in $= 3.75 \div 16.25$ m/s. It is noted that an increase in the aerodynamic resistance of the trunk mouth due to the conversion of the energy of the main fan jet using guide plates makes it possible to reduce leaks of atmospheric air injected into underground mining by 45 %. It is shown that for the installation of an aerodynamic curtain at the mouth of the trunk with the suction method of ventilation, a mine fan of local ventilation is necessary. An approximate assessment of the effectiveness of its use in conjunction with a guide plate placed at the point where the axis of the fan jet adjoins the trunk wall is given. It is stated that the proposed method will reduce air suction through the mouth of the shafts of the largest underground mines and mines by 3 to 3.5 times. The prospects for further development of these studies are outlined.

Введение

При разработке месторождений полезных ископаемых подземным способом важнейшим условием безопасности труда является обеспечение нормативного состава воздуха на многочисленных рабочих местах, рассредоточенных в горных выработках общей протяжённостью до 100 км [1]. Для организации воздухообмена используют вентиляционный комплекс, включающий системы воздухоподготовки и воздухораспределения и вентиляторы главного (ВГП) и местного (ВМП) проветривания [1-10]. На крупных предприятиях количество ВГП мощностью 0,5÷4 тыс. кВт может достигать 20 шт., а ВМП мощностью 4÷110 кВт – 40 шт. [1]. В этом случае годовой расход электроэнергии на работу вентиляционного комплекса исчисляется многими десятками и сотнями млн. кВт·ч, причём существенная часть указанного расхода тратится на компенсацию утечек или притоков воздуха через расположенный между вентиляционным окном и выходом на поверхность концевой участок шахтного ствола [11]. При отсутствии мер борьбы с внешними (поверхностными) утечками расход воздуха на этом участке ствола Q_y может составить 60% от производительности ВГП Q_v [12].

Расчётную подачу и мощность ВГП принято увеличивать на стадии проектирования с учётом прогнозируемых внешних утечек [13]. При известном расходе воздуха $Q_{ш}$, необходимом для проветривания горных выработок, требуемую производительность ВГП устанавливают следующим образом [14]:

$$Q_v = k_{внеш} \cdot Q_{ш}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (1)$$

где $k_{внеш}$ – коэффициент, учитывающий внешние утечки воздуха через устье ствола и каналы вентиляторов, который равен: 1,10 – при размещении вентилятора на стволах и шурфах, не используемых для подъёма; 1,20 – на клетевом стволе; 1,25 – на скиповом; 1,30 – на шурфах, используемых для подъёма и спуска материалов.

Технические решения, направленные на уменьшение величины поверхностных утечек воздуха, можно разделить на три группы [12].

К первой группе относятся инженерные мероприятия, обеспечивающие герметизацию устья шахтного ствола, надшахтного здания и поверхностных сооружений. Гуммирование стен и фундаментов зданий и сооружений и установка воздушных клапанов в устье ствола требуют больших затрат и недостаточно эффективны при использовании ствола для подъёма грузов и людей [15].

Вторая группа включает технические предложения, связанные с увеличением аэродинамического сопротивления устья ствола с помощью воздушной завесы, создаваемой ВМП. Применение необходимого количества ВМП требует дополнительной мощности, что не позволяет существенным образом снизить расход энергии на вентиляцию подземного предприятия [16].

Третья группа объединяет разнообразные технические решения, основанные на размещении ВГП в подземных выработках. Однако, в этом случае ослабляется аэродинамическая связь ВГП с поверхностью, что, принимая во внимание сложную топологию вентиляционных сетей действующих шахт, может вызывать нарушения воздухообмена с внешней средой, образование застойных участков и рециркуляционных зон [17, 18].

Для изыскания и внедрения в производственную практику более совершенных технических решений необходимы исследовательские экспериментальные работы, значительную часть которых можно провести в лабораторных условиях на физических моделях шахтных вентиляционных систем.

Данная статья посвящена опытному изучению закономерностей аэродинамических процессов, протекающих в устье ствола и в прилегающих зонах, и обоснованию методов и средств борьбы с поверхностными утечками воздуха, обеспечивающих снижение энергоёмкости искусственного проветривания подземных рудников и шахт.

Основная часть

Для исследования аэродинамических процессов на верхнем участке шахтного ствола при нагнетательном и всасывающем способах проветривания была создана физическая

модель этого участка. Масштабный коэффициент линейных размеров M_L натурального объекта и физической модели был принят равным 77:1.

Корректность воспроизведения рассматриваемых процессов в лабораторных условиях обеспечивалась соблюдением условий кинематического и динамического подобия. Для аэрогидромеханических явлений определяющими критериями динамического подобия натуральных и лабораторных процессов являются числа Рейнольдса (Re) и Фруда (Fr), т.е. для обеспечения пропорциональности явлений требуется соблюдение двух условий: $Re_n = Re_m$, $Fr_n = Fr_m$, где индексы «н» и «м» относятся, соответственно, к натурным параметрам и к параметрам модели. Так как на практике сложно или даже невозможно добиться одновременного выполнения данных условий, то в исследуемых процессах и явлениях выделяют наиболее значимые действующие силы и обеспечивают физическое подобие их действия в лабораторном процессе [19].

Механика жидкости учитывает следующие силы: силы упругости, тяжести, инерции, давления, вязкости и поверхностного натяжения. Изучение закономерностей аэродинамических процессов, протекающих в устье шахтного ствола целесообразно проводить с соблюдением подобия сил тяжести и инерции. В связи с этим, при расчёте параметров физической модели шахтной вентиляционной системы (табл. 1) использовался критерий Фруда. Данный критерий подобия заключается в равенстве отношений следующих параметров изучаемых процессов, протекающих в натуральных (реальных) условиях и на модели:

$$\frac{u_n^2}{g \cdot D_n} = Fr_n = Fr_m = \frac{u_m^2}{g \cdot D_m}, \quad (2)$$

где u – средняя скорость воздушного потока в вентиляционном окне, м/с; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; D – линейный размер вентиляционного окна, м.

Учитывая, что $D_m = D_n / M_L$, скорость движения воздушного потока u_m и его расход Q_m в вентиляционном окне модели рассчитывали по формулам

$$u_m = \sqrt{\frac{u_n^2 \cdot D_m}{D_n}} = \frac{u_n}{\sqrt{M_L}} = \frac{Q_n}{B_n \cdot H_n \cdot \sqrt{M_L}}, \quad (3)$$

$$Q_m = u_m \cdot B_m \cdot H_m, \quad (4)$$

где Q_n – расход воздуха в вентиляционном окне натурального объекта, $\text{м}^3/\text{с}$; B – ширина окна, м; H – высота окна, м.

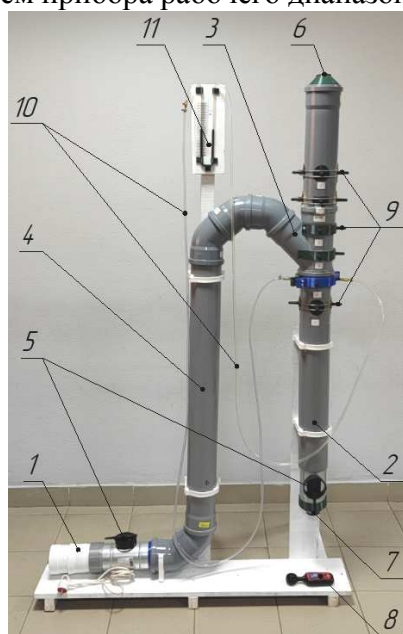
Табл. 1. Натурные и модельные параметры шахтной вентиляционной системы

Параметры	Значения параметров	
	натурного объекта	модели
Длина верхнего участка вертикального ствола, м	111,5	1,45
Внутренний диаметр ствола, м	8	0,104
Угол наклона вентиляционного канала, град	45	45
Длина вентиляционного канала, м	9,3	0,12
Ширина вентиляционного окна, м	4	0,053
Высота вентиляционного окна, м	5	0,067
Производительность ВГП, $\text{м}^3/\text{с}$	75÷325	0,001÷0,006
Средняя скорость воздушного потока в вентиляционном окне, м/с	3,75÷16,25	0,43÷1,85

В качестве силового агрегата модели (рис. 1) был использован двухступенчатый осевой вентилятор 1 с направляющим аппаратом между ступенями. При реализации нагнетательного или всасывающего способов искусственного проветривания вентилятор 1 обеспечивал необходимое манометрическое $p_m = p_{cm} - p_a$ или вакуумметрическое $p_v = p_a - p_{cm}$ статическое давление (здесь p_{cm} – пьезометрическое давление воздуха внутри ствола, Па; p_a – атмосферное давление, Па) в вертикальном стволе 2. При изменении способа проветривания

вентилятор поворачивали на 180° . Наклонный вентиляционный канал 3, предназначенный для сопряжения вентилятора 1 со стволом 2, был соединён с вентилятором с помощью промежуточного воздуховода 4 для более удобной компоновки модели.

Основным фактором, оказывающим влияние на аэродинамические процессы в устье ствола при заданных геометрических параметрах вентиляционных каналов (см. табл. 1), является средняя скорость воздушного потока в вентиляционном окне u_n . Для реализации этого фактора в модели была проведена серия опытов, в ходе которых скорость u_m последовательно увеличивали путём регулирования подачи вентилятора 1 с помощью поворотных шиберов 5. Расход воздуха в вентиляционном окне Q_m и соответствующую скорость u_m определяли, суммируя расходы воздуха в отверстиях 6 и 7, которые, в свою очередь, рассчитывали по известным формулам после измерения скорости воздушных потоков в указанных отверстиях с помощью переносного анемометра 8 фирмы ADA. Анемометр ADA AeroTemp 30 позволил контролировать скорость перемещения воздушных масс в интервале от 0 до 30 м/с с шагом 0,1 м/с и точностью $\pm 3\%$. Точность определения температуры воздуха $\pm 1,2^\circ\text{C}$. Измерения проводились при температуре окружающей среды $18\div 22^\circ\text{C}$, т.е. в пределах заявленного изготовителем прибора рабочего диапазона температур от 0 до 50°C .



- 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 – соединительные шланги;
- 11 – U-образный водяной пьезометр

Рис. 1. Физическая модель шахтной вентиляционной системы:

Для измерения пьезометрического давления $p_{ст}$ внутри ствола 2 в его стенке были предусмотрены 22 сквозных отверстия диаметром 3 мм. Каждое отверстие снабжалось индивидуальным патрубком 9 с наружной резьбой на которую накручивалась пробка, а при измерении давления $p_{ст}$ при заданной скорости u_m – соединительная муфта шланга 10 от U-образного жидкостного пьезометра 11. Шкала пьезометра позволяла производить замеры давления в диапазоне от -100 до $+100$ мм вод. ст. с точностью $\pm 1\%$.

Для визуализации результатов измерений, полученных при различных режимах работы ВГП, были составлены карты полей статического давления на развёрнутой в плоскость внутренней цилиндрической поверхности ствола (рис. 2, 3). На этих картах удалось показать порядок изменения статического давления в устье ствола и, следовательно, важные особенности распределения скоростей и расходов воздуха в зонах внешних утечек.

При нагнетательном способе проветривания под действием сил манометрического давления ВГП в стволе формируются восходящий и нисходящий потоки воздуха с весьма неравномерным распределением скоростей по горизонтальному сечению потоков. В зависимости от скорости истечения воздуха из вентиляционного окна u_n максимальные скорости движения воздушных масс, восходящих к устью ствола, регистрировались в следующих зонах внешних утечек:

- при $u_n = 3,75 \div 6,25$ м/с – вдоль линий короткого тока воздуха;
- при $u_n = 8,75 \div 11,25$ м/с – вдоль линий длинного тока (рис. 2);
- при $u_n = 13,75 \div 16,25$ м/с – вдоль вертикальной оси ствола.

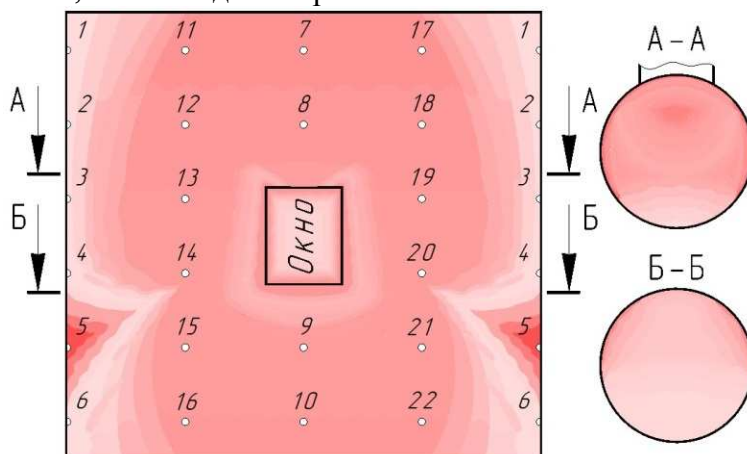


Рис. 2. Карта полей манометрического статического давления в верхней части ствола при истечении воздуха из вентиляционного окна со скоростью $u_n = 8,75$ м/с

При всасывающем способе искусственного проветривания движение воздушных масс в стволе, сформированное вакуумметрическим давлением ВГП, направлено в сторону вентиляционного окна. Поля статического давления в верхней части ствола не имеют между собой резких границ, за исключением активной зоны всасывания, прилегающей к вентиляционному окну (рис. 3), где скорость движения воздуха значительно возрастает.

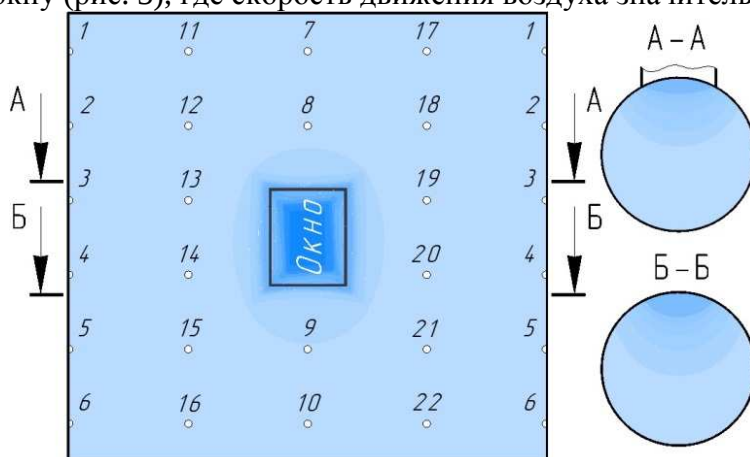


Рис. 3. Карта полей вакуумметрического статического давления воздуха в верхней части ствола при всасывающем способе общеобменной вентиляции шахты

Анализ технической и патентной литературы и полученных карт распределения статического давления в шахтном стволе послужил основанием для разработки нового способа снижения поверхностных утечек воздуха при нагнетательной общеобменной вентиляции подземных выработок [20], реализуемого путём повышения аэродинамического сопротивления устья ствола с помощью инерционных вихрей, создаваемых за счёт энергии исходящей струи ВГП. Данное техническое предложение может быть осуществлено с помощью направляющих пластин, прикреплённых к стенке ствола.

Для опытного изучения результатов взаимодействия пластин с потоками воздуха было выполнено физическое моделирование этого процесса на гидродинамической модели, где воздушные потоки были заменены водяными. Это позволило простыми средствами создавать и регулировать потоки текучего в модели и измерять их параметры. Коэффициент пропорциональности M_L линейных размеров натурного объекта и гидродинамической модели был принят равным 172:1. В качестве критерия кинематического и динамического подобия использовалось число Фруда.

Опытному изучению на модели были подвергнуты 30 схем расстановки указанных пластин. Четыре перспективные схемы представлены на рисунке 4. Согласно схемам № 1 и 2, наклонные пластины полукольцевой формы устанавливались горизонтально поперёк линий короткого (рис. 4, а) и длинного (рис. 4, б) тока рабочей жидкости. Схемы № 3 и 4 основывались на применении кольцевых пластин, прикрепляемых к стенке ствола горизонтально (рис. 4, в) или наклонно (рис. 4, г).

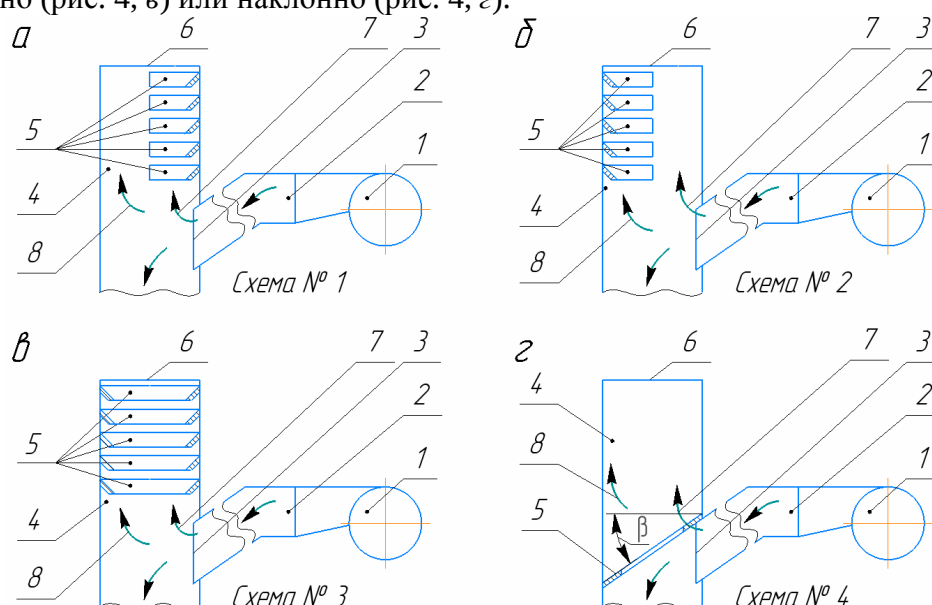


Рис. 4. Схемы размещения направляющих пластин для снижения поверхностных утечек воздуха при нагнетательном способе искусственного проветривания: 1 – главная вентиляторная установка; 2 – вентиляционный канал; 3 – вентиляционное окно; 4 – вертикальный ствол; 5 – направляющие пластины; 6 – изготовленная на 3D-принтере цилиндрическая вставка в устье ствола с профилированной внутренней поверхностью; 7 и 8 – линии короткого и длинного тока рабочей жидкости

При реализации схем № 1, 2 и 3 (рис. 4, а, б и в) использовались пять пластин шириной $b_n = 1$ м. Угол наклона рабочей поверхности пластин к горизонтальному уровню их крепления к стенке ствола $\alpha = 0^\circ$, интервал между горизонтальными уровнями крепления соседних пластин $l_n = 2,45$ м.

Схема № 4 (рис. 4, г) основывалась на применении одной кольцевой пластины, размещаемой в наклонной плоскости, проходящей через верхнюю границу вентиляционного окна под углом $\beta = 45^\circ$ относительно горизонтального уровня, т.е. параллельно оси исходящей из окна струи. Ширина пластины $b_n = 1$ м, угол наклона рабочей поверхности пластины к плоскости её крепления к стенке ствола $\alpha = 0^\circ$.

Эффективность рассматриваемых схем установки пластин оценивалась с помощью показателя утечек воздуха через устье ствола (рис. 5)

$$\Psi_y = Q_{yi} / Q_{y0}, \quad (5)$$

где Q_{yi} – утечки воздуха через устье ствола с аэродинамической завесой, создаваемой с помощью направляющих пластин (направляющих элементов), размещённых в соответствии со схемой № i , $\text{м}^3/\text{с}$; Q_{y0} – утечки воздуха через устье ствола при отсутствии направляющих пластин, $\text{м}^3/\text{с}$.

Итогом опытных работ на гидродинамической модели стал вывод о том, что установка направляющих пластин в устье ствола позволяет существенно снижать поверхностные утечки воздуха при нагнетательном способе искусственного проветривания подземных рудников и шахт.

Результаты аппроксимации опытных данных, представленные графически на рисунке 5, дали возможность численно оценить эффективность рассматриваемых схем установки пластин и рекомендовать для практического применения в шахтном стволе схему № 4.

Установка кольцевой пластины 8 вдоль границы разделения восходящего 5 и нисходящего 6 потоков воздуха, например, в наклонной плоскости, проходящей через верхнюю кромку вентиляционного окна 3 параллельно оси 10 канала 2 (рис. 6), приводит к снижению показателя утечек Ψ_y в 1,5÷2 раза при скорости истечения воздуха из окна 3 $u_n = 3,75 \div 16,25$ м/с (см. график 4 на рисунке 5). При предельно допустимой скорости $u_n = 15$ м/с утечки воздуха уменьшаются на 45%.

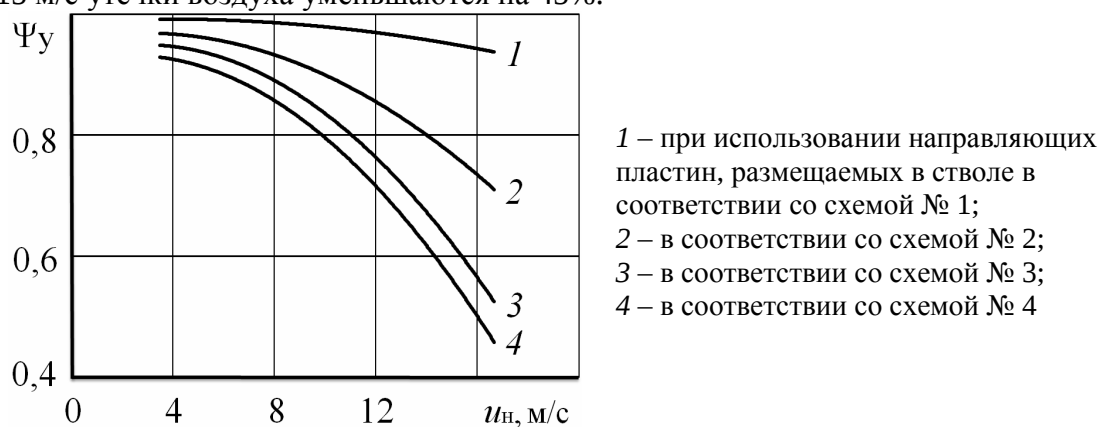


Рис. 5. Графики зависимости показателя утечек воздуха через устье ствола от средней скорости воздушного потока в вентиляционном окне

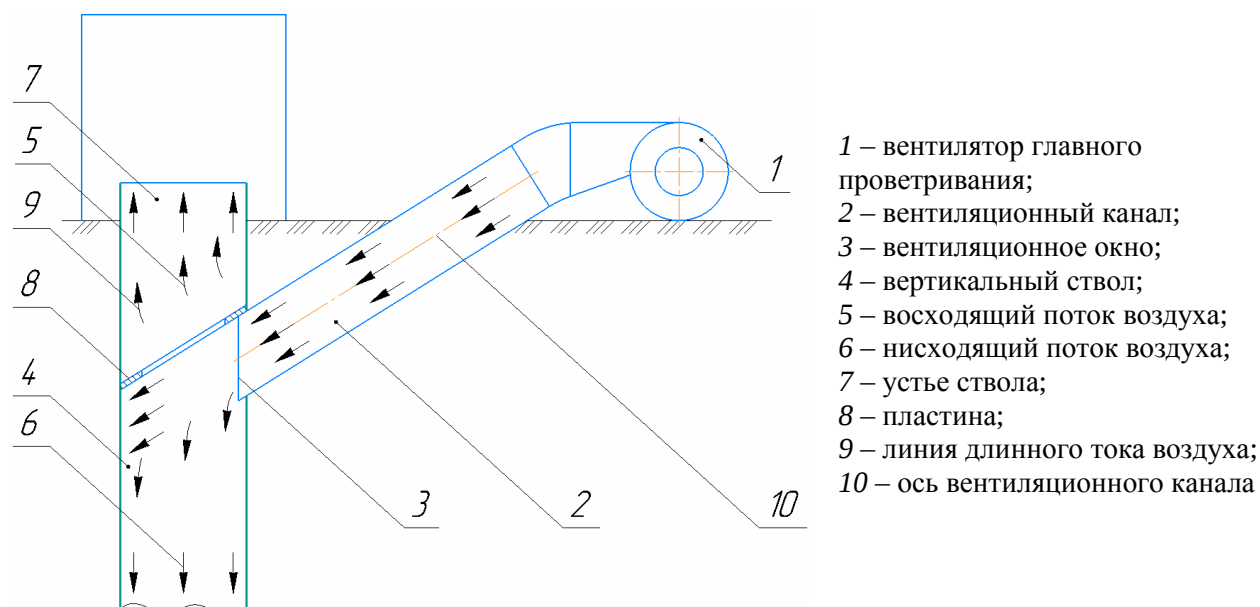


Рис. 6. Снижение утечек воздуха через устье ствола с помощью наклонной кольцевой пластины при нагнетательном способе общеобменной вентиляции:

Для повышения аэродинамического сопротивления устья ствола с помощью направляющих устройств при работе ВГП во всасывающем режиме требуется вспомогательная воздухоудная установка (например, рудничный ВМП) для создания в зоне утечек воздуха плоской высокоскоростной струи [21]. При взаимодействии горизонтальной или слабонаклонной плоской струи, исходящей из ВМП 5 (рис. 7), с направляющей пластиной 8 или с другим направляющим элементом, выполненным, например, в виде аэродинамически профилированного полукольца, формируются две рециркуляционные ячейки. Верхняя рециркуляционная ячейка образует завесу и служит преградой на пути движения атмосферного воздуха. Вторая ячейка обеспечивает наддув воздушных масс в сторону вентиляционного окна 3.

Забор воздуха для формирования плоской струи осуществляют через приёмное отверстие всасывающего воздуховода 6, которое размещают ниже вентиляционного окна. Фактически, вентиляционная установка в стволе 4 обеспечивает подъём воздушных масс в

его верхнюю часть, что дополнительно снижает приток атмосферного воздуха. По ориентировочным оценкам, применение ВМП мощностью до $15\div 20$ кВт в совокупности с направляющей пластиной позволит уменьшить подсосы воздуха через устье стволов крупнейших подземных рудников и шахт в $3\div 3,5$ раза.

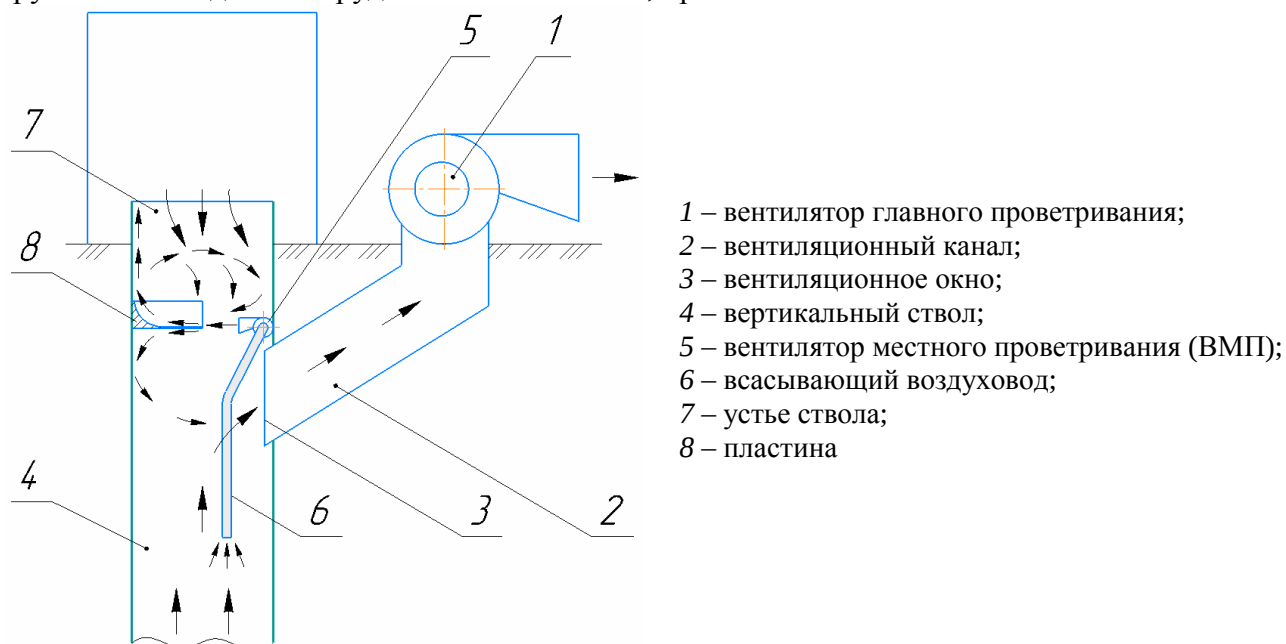


Рис. 7. Снижение притоков воздуха через устье ствола с помощью вентилятора местного проветривания и направляющей пластины при всасывающем способе общеобменной вентиляции

Заключение

1. Экспериментальные работы на физической модели вентиляционной системы позволили обосновать новые способы постановки воздушных завес в устье шахтного ствола для снижения утечек или подсосов воздуха с учётом особенностей аэродинамических процессов при нагнетательном и всасывающем режимах работы ВГП. Указанные способы связаны с применением прикрепляемых к стенке ствола направляющих пластин или других направляющих элементов, способствующих более полному преобразованию кинетической энергии струи, исходящей из ВГП или ВМП, в энергию инерционных воздушных вихрей, обеспечивающих повышение аэродинамического сопротивления устья ствола.

2. Для уменьшения поверхностных утечек воздуха при нагнетательном способе общеобменного проветривания целесообразно использовать кольцевую пластину максимальной возможной ширины b_n , прикрепляемую к стенке ствола в наклонной плоскости, проходящей через верхнюю границу вентиляционного окна параллельно оси исходящей из окна воздушной струи, при угле наклона рабочей поверхности пластины к плоскости её крепления $\alpha = 0^\circ$. Опыт использования указанных пластин шириной $b_n = 1$ м на физической модели вентиляционной системы дал возможность оценить их влияние на процессы преобразования энергии ВГП в энергию инерционных вихрей по сравнению с другими апробированными направляющими элементами как оптимальное, обеспечившее снижение утечек воздуха через устье ствола в $1,5\div 2$ раза.

3. Для постановки аэродинамической завесы в устье ствола при всасывающем способе проветривания требуются вспомогательные воздуходувные устройства. В качестве такого устройства может быть использован рудничный ВМП мощностью до $15\div 20$ кВт. Установка направляющей пластины (направляющего элемента) в пункте примыкания оси горизонтальной или слабонаклонной плоской струи ВМП к стенке ствола, позволяет, как и в рассмотренном выше случае, увеличить энергию инерционных вихрей и эффективность завесы. Действие аэродинамической завесы и организованный работой ВМП подъём значительных объёмов воздуха выше уровня вентиляционного окна способствуют снижению притока атмосферного воздуха через устье ствола в $3\div 3,5$ раза.

4. При разработке технологических схем постановки аэродинамической завесы в устье ствола необходимо проведение дополнительных исследований, связанных с обоснованием рабочих параметров ВМП и позиционных параметров направляющих пластин, обеспечивающих наддув воздуха в сторону вентиляционного окна.

Список литературы

1. Ушаков В.К. Проблема надежности и эффективности шахтных вентиляционных систем // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 4. – С. 240-248.
2. Алыменко Н.И., Минин В.В., Папулов Л.М. Снижение внешних утечек воздуха на рудниках и шахтах // Горный журнал. – 1994. – № 6. – С. 46-47.
3. Абрамов Ф.А. Аэродинамическое сопротивление горных выработок. – М: Недра, 1964. – 186 с.
4. Сапожников С.С., Марьясов Д.А. Кольцевые камеры вентиляционных комплексов подземных горнодобывающих предприятий // Проспект Свободный – 2023: материалы XIX Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Красноярск, 24-29 апреля 2023г. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2023. – С. 2649-2651.
5. Huang X., Liu Y. Research and design of intelligent mine ventilation construction architecture // International Journal of Low-Carbon Technologies. 2022, no. 17, pp. 1232-1238. doi.org/10.1093/ijlct/ctac104.
6. Wallace K., Stinnette J. D. The practice of mine ventilation engineering // International Journal of Mining Science and Technology. 2015, vol. 25, no. 2, pp. 165-169. doi.org/10.1016/j.ijmst.2015.02.001.
7. Hou J., Nie G., Li G., Zhao W., Sheng B. Optimization of Branch Airflow Volume for Mine Ventilation Network Based on Sensitivity Matrix // Sustainability. 2023, no. 15, p. 12427. doi.org/10.3390/su151612427.
8. Nel A.J.H., Vosloo J.C., Mathews M.J. Evaluating complex mine ventilation operational changes through simulations // Journal of Energy in Southern Africa. 2018, vol. 29, no. 3, pp. 22-32. doi.org/10.17159/2413-3051/2018/v29i3a4445.
9. Yi H., Kim M., Lee D., Park J. Applications of Computational Fluid Dynamics for Mine Ventilation in Mineral Development // Energies. 2022, no. 15, p. 8405. doi.org/10.3390/en15228405.
10. Сенкус Вал.В., Ермаков Н.А., Сенкус В.В. Особенности вентиляции горных выработок при комбинированном способе разработки угольных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 5. – С. 89-94.
11. Сыркин П.С., Панкратенко А.Н., Плешко М.С. Шахтное и подземное строительство. Технология строительства вертикальных стволов. – М.: НИТУ МИСиС, 2023. – 527 с.
12. Каменских А.А. Разработка методов контроля и снижения поверхностных утечек воздуха на рудниках: дис. ... канд. техн. наук. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2011. – 143 с.
13. Русский Е.Ю. Повышение эффективности работы эксплуатируемых вентиляторов главного проветривания шахт и метрополитенов: дисс. ... докт. техн. наук. – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2022. – 370 с.
14. Гришко А.П., Шелоганов В.И. Стационарные машины и установки. – М.: МГТУ, 2004. – 328 с.
15. Алыменко Н.И. Вентиляторные установки и их применение. – Екатеринбург: ГИ УрО РАН, 1999. – 224 с.
16. Ушаков К.З., Бурчаков А.С., Пучков Л.А., Медведев И.И. Аэрология горных предприятий. – М: Недра, 1987. – 421 с.
17. Зольников Н.А., Цыганков С.Н., Шваб Р.Г. О местоположении главной вентиляторной установки шахт и рудников // Горный журнал. – 2007. – № 11. – С. 73-74.
18. Зайцев А.В., Трушкова Н.А. Исследование рециркуляционного проветривания при наличии источника газовыделения в рабочей зоне и внутренних утечек воздуха // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 3. – С. 34-46.
19. Морин А.С. Обоснование технологии трубопроводного проветривания глубоких карьеров: дисс. ... докт. техн. наук. – Красноярск: СФУ, 2011. – 211 с.
20. Патент №2819382 РФ. Способ проветривания подземных горных выработок / А.С. Морин, С.С. Сапожников, И.С. Плотников, Д.А. Марьясов. – Заявка №2023128322 от 02.11.2023; опубли. 20.05.2024, Бюл. № 14.
21. Патент №2794437 РФ. Устройство для создания воздушной завесы в устье шахтного вентиляционного ствола / А.С. Морин, С.С. Сапожников. – Заявка №2022119285 от 13.07.2022; опубли. 18.04.2023, Бюл. № 11.

References

1. Ushakov V.K. The problem of reliability and efficiency of mine ventilation systems // Mining Informational and Analytical Bulletin. 2015, no. 4, pp. 240-248.
2. Alymenko N.I., Minin V.V., Papulov L.M. Reduction of external air leaks in mines and mines // Mining Journal. 1994, no. 6, pp. 46-47.
3. Abramov F.A. Aerodynamic resistance of mine workings. – M.: Nedra, 1964. – 186 p.
4. Sapozhnikov S.S., Maryasov D.A. Ring chambers of ventilation complexes of underground mining enterprises // Svobodny Prospect – 2023: materials of the XIX International Scientific Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists. Krasnoyarsk, April 24-29, 2023. – Krasnoyarsk: SFU, 2023. – P. 2649-2651.

5. Huang X., Liu Y. Research and design of intelligent mine ventilation construction architecture // International Journal of Low-Carbon Technologies. 2022, no. 17, pp. 1232-1238. doi.org/10.1093/ijlct/ctac104.
6. Wallace K., Stinnette J. D. The practice of mine ventilation engineering // International Journal of Mining Science and Technology. 2015, vol. 25, no. 2, pp. 165-169. doi.org/10.1016/j.ijmst.2015.02.001.
7. Hou J., Nie G., Li G., Zhao W., Sheng B. Optimization of Branch Airflow Volume for Mine Ventilation Network Based on Sensitivity Matrix // Sustainability. 2023, no. 15, p. 12427. doi.org/10.3390/su151612427.
8. Nel A.J.H., Vosloo J.C., Mathews M.J. Evaluating complex mine ventilation operational changes through simulations // Journal of Energy in Southern Africa. 2018, vol. 29, no. 3, pp. 22-32. doi.org/10.17159/2413-3051/2018/v29i3a4445.
9. Yi H., Kim M., Lee D., Park J. Applications of Computational Fluid Dynamics for Mine Ventilation in Mineral Development // Energies. 2022, no. 15, p. 8405. doi.org/10.3390/en15228405.
10. Senkus Val.V., Ermakov N.A., Senkus V.V. Features of ventilation of mine workings with a combined method of developing coal deposits // Mining Informational and Analytical Bulletin. 2018, no. 5, pp. 89-94.
11. Syrkin P.S., Pankratenko A.N., Pleshko M.S. Mine and underground construction. Technology of construction of vertical shafts. – M.: NUST MISIS, 2023. – 527 p.
12. Kamenskikh A.A. Development of methods for controlling and reducing surface air leaks in mines: Diss. ... cand. of tech. sc. – Perm: GI UrO RAS, 2011, 143 p.
13. Russkiy E.Yu. Improving the efficiency of the operated fans of the main ventilation of mines and subways: Diss. ... doct. of tech. sc. – Novosibirsk: IGD SB RAS, 2022, 370 p.
14. Grishko A.P., Sheloganov V.I. Stationary machines and installations. – M.: MSMU, 2004. – 328 p.
15. Alymenko N.I. Fan installations and their application. – Yekaterinburg: GI UrO RAS, 1999. – 224 p.
16. Ushakov K.Z., Burchakov A.S., Puchkov L.A., Medvedev I.I. Aerology of mining enterprises. – M.: Nedra, 1987. – 421 p.
17. Zolnikov N.A., Tsygankov S.N., Shvab R.G. On the location of the main fan installation of mines and mines // Mining Journal. 2007, no. 11, pp. 73-74.
18. Zaitsev A.V., Trushkova N. A. Investigation of recirculation ventilation in the presence of a gas source in the work area and internal air leaks // Mining Informational and Analytical Bulletin. 2022, no. 3, pp. 34-46.
19. Morin A.S. Substantiation of the technology of pipeline ventilation of deep quarries: Diss. ... doct. of tech. sc. – Krasnoyarsk: SFU, 2011. – 211 p.
20. Patent No. 2819382 RU. Method of ventilation of underground mine workings / A.S. Morin, S.S. Sapozhnikov, I.S. Plotnikov, D.A. Maryasov. – Appl. No. 2023128322 from 02.11.2023; publ. 20.05.2024, Bul. No. 14.
21. Patent No. 2794437 RU. Device for creating an air curtain at the mouth of a mine ventilation shaft / A.S. Morin, S.S. Sapozhnikov. – Appl. No. 2022119285 from 13.07.2022; publ. 18.04.2023, Bul. No. 11.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Морин Андрей Степанович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Горные машины и комплексы»	Morin Andrey Stepanovich – doctor of technical sciences, associate professor, head of the Department of mining machines and complexes
Сапожников Сергей Сергеевич – аспирант	Sapozhnikov Sergey Sergeevich – postgraduate student
Анушенков Александр Николаевич – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Подземная разработка месторождений»	Anushenkov Alexander Nikolaevich – doctor of technical sciences, head of the Department of underground mining
Касьянова Елена Николаевна – доцент, доцент кафедры «Инженерная графика»	Kasyanova Elena Nikolaevna – associate professor, associate professor of the Department of engineering graphics
Штреслер Кристина Александровна – старший преподаватель кафедры «Бизнес-информатика и моделирование бизнес процессов» kshtrleser@sfu-kras.ru	Shtresler Kristina Aleksandrovna – senior lecturer of the Department of business informatics and business process modeling

Получена 18.11.2024