УДК 622.271.3.42

Новые технические решения по проветриванию глубоких карьеров

С.Г.ШАХРАЙ¹, Г.С.КУРЧИН¹✉, А.Г.СОРОКИН²

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² Красноярский автотранспортный техникум, Красноярск, Россия

В статье рассмотрены проблемы проветривания глубоких карьеров, вызванные интенсификацией взрывных работ на больших глубинах карьерного пространства, увеличением расстояния доставки руды автомобильным транспортом на дневную поверхность, постоянным изменением геометрических параметров карьера, его микрорельефа и направления горных работ, возрастанием степени изоляции выработанного пространства от окружающей среды. Выполнен краткий критический анализ известных средств искусственного проветривания глубоких карьеров, который показал, что применение средств искусственного проветривания в глубоких карьерах зачастую проблематично, поскольку данные установки характеризуются высоким энергопотреблением, значительным уровнем создаваемого ими шума, превышающим допустимые параметры, а высокие скорости вентиляционных струй несут риск сдувания пыли с поверхностей карьера.

В статье представлены разработанные в Сибирском федеральном университете способы и технические средства интенсификации естественного проветривания глубоких карьеров за счет изменения плотности воздуха на входе в карьер и выходе из него, а также прогрева теневого бортов карьера с помощью зеркал солнечной энергией, не создающие помех выполнению технологических операций и ведению взрывных работ.

Ключевые слова: глубокий карьер; проветривание; изменение плотности ветрового потока; увлажнение воздуха; система зеркал; солнечная энергия

Как цитировать эту статью: Шахрай С.Г. Новые технические решения по проветриванию глубоких карьеров / С.Г.Шахрай, Г.С.Курчин, А.Г.Сорокин // Записки Горного института. 2019. Т. 240. С. 654-659. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.654

Введение. К особенностям эксплуатации глубоких и сверхглубоких карьеров относится ухудшение атмосферы рабочей зоны, вызванное:

- снижением влияния ветровых и тепловых сил, осуществляющих проветривание карьерного пространства;
- интенсификацией взрывных работ вследствие роста крепости горных пород, залегаемых на больших глубинах;
- увеличением расстояния доставки на дневную поверхность добытой руды автомобильным транспортом, являющимся одним из основных источников загрязнения атмосферы газами и пылью;
- усилением десорбции газов под влиянием сброса давления и разрушений, вызванных добычей полезных ископаемых [16].

Причинами нарушения воздухообмена в карьере могут стать метеорологические условия – температурный градиент менее 1 °С на 100 м глубины или инверсионное распределение температур, затрудняющие подъем воздушных масс с нижних горизонтов ввиду их большого удельного веса.

Применение традиционных средств искусственного проветривания – самолетных и вертолетных винтов, турбин, тепловых установок – в глубоких и сверхглубоких карьерах зачастую проблематично вследствие их дороговизны, громоздкости, создания помех выполнению технологических операций, высокого энерго- и топливopotребления. Сжигаемое в установках топливо, а также высокие скорости вентиляционных струй, сдувающих пыль с бортов, способны, напротив, ухудшить состояние атмосферы карьера, а необходимость удаления установок на безопасное расстояние при ведении взрывных работ приводит к росту эксплуатационных затрат. Эксплуатация вентиляторов требует их постоянного технического обслуживания, так как мощность и производительность тягодутьевой машины напрямую зависит от угла наклона лопаток рабочего колеса [17].

В статье предложены новые технические решения интенсификации естественного проветривания карьеров за счет использования теплоты солнечных лучей и рудничных вод, удаляемых системой водоотлива, а также за счет использования опережающих траншей, устраиваемых в разрабатываемом горном массиве.

Постановка проблемы. В XX в. в мире открытым способом добывалось 95 % строительных горных пород, около 70 % руд, 90 % бурых и 20 % каменных углей. По мере отработки и истощения мелкозалегающих запасов полезных ископаемых глубина их добычи увеличивается. С углублением открытых работ степень изоляции выработанного пространства от окружающей среды возрастает, а состав атмосферы карьера ухудшается. Эксплуатация глубоких и сверхглубоких карьеров глубиной 500-600 м и более сопровождается интенсификацией взрывных работ вследствие повышения крепости залегаемых горных пород, увеличением расстояния транспортирования горной массы на поверхность, ухудшением условий естественного проветривания карьерного пространства и увеличением объема застойной зоны. Вследствие этого при выработке проектных решений большое внимание должно быть уделено решению задач социальной направленности – улучшению условий труда непосредственно на рабочих местах [4, 6, 10].

Применение известных средств искусственного проветривания в глубоких и сверхглубоких карьерах [2, 5, 7, 11, 13] зачастую проблематично, так как их эксплуатация сопровождается значительным уровнем шума, превышающим допустимые параметры. Высокие скорости вентиляционных струй несут риск сдувания пыли с бортов карьера, что дополнительно ухудшает состояние атмосферы рабочей зоны. Сгорание авиационного топлива в двигателях, а также угольной пыли в турбине (в случае ее использования для проветривания угольных разрезов) несет риск образования и увеличения концентрации СО и SO₂, акролеина и формальдегида в воздухе рабочей зоны. Ухудшение состояния атмосферы может наблюдаться и при использовании тепловых установок, формирующих конвективные струи за счет сжигания дизельного топлива. Общим недостатком средств искусственной вентиляции является высокий расход топлива и создаваемый ими уровень шума, необходимость удаления оборудования на безопасное расстояние в период ведения взрывных работ, что сопровождается ростом операционных затрат и сверхплановых простоев. Даже краткое перечисление недостатков известных технологий и технических средств проветривания глубоких карьеров объясняет постоянный поиск более эффективных и безопасных способов и средств интенсификации воздухообмена на таких производствах.

В Сибирском федеральном университете разработаны способы и средства интенсификации проветривания глубоких и сверхглубоких карьеров за счет создания разности плотностей воздуха, поступающего в карьерное пространство и выходящего из него, а также более эффективного использования солнечной энергии, поступающей на земную поверхность.

Изменение плотности воздуха обеспечивается пропусканием ветрового потока через водяную завесу, образованную распылением холодной или горячей воды, в соответствии с рис.1*. В теплый период года ветровой поток, поступающий в карьерное пространство, пропускают через водяную завесу, образованную распылением холодной воды на подветренной стороне карьера, выходящий из карьерного пространства – через водяную завесу, образованную распылением горячей воды на наветренном борту карьера (рис.1, а).

Рис.1. Эпюры ветровых потоков, пропускаемых через водяные завесы в теплый период года (а), в холодный период года и в период атмосферных инверсий (б)

1 – трубопровод горячей воды; 2 – трубопровод холодной воды; 3 – подветренный борт карьера; 4 – карьерное пространство; 5 – наветренный борт карьера

* Патент № 2584700. Способ проветривания карьера / С.Г.Шахрай, Л.Г.Годовникова, К.С.Едемская и др. Опубл. 22.01.2016. Бюл. № 4.

Укрупненная инженерная оценка данного технического решения выполнена с помощью следующих зависимостей. При прохождении через водяную завесу влагосодержание воздуха d и масса пара во влажном воздухе возрастают в соответствии с зависимостью

$$d = \frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{с}}}, \quad (1)$$

где $M_{\text{п}}$ – масса водяного пара во влажном воздухе; $M_{\text{с}}$ – масса сухой части влажного воздуха.

При этом температура и объем газовой смеси падают, а барометрическое давление воздуха, поступающего в карьерное пространство, возрастает согласно закону Дальтона

$$P_6 = P_{\text{с}} + P_{\text{п}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{с}}$ и $P_{\text{п}}$ – парциальное давление сухого воздуха и водяного пара соответственно, определяемые по уравнению Клапейрона

$$P_{\text{с}} = \frac{M_{\text{с}} R_{\text{с}} T}{V}, \quad (3)$$

$$P_{\text{п}} = \frac{M_{\text{п}} R_{\text{п}} T}{V}. \quad (4)$$

Помимо роста барометрического давления по мере увеличения влажности воздуха повышается его плотность, что следует из зависимости

$$P_{\text{в}} = \frac{P_6(1+d)}{0,2871T(1+1,6078d)}. \quad (5)$$

При прохождении через водяную завесу, образованную распылением горячей воды, температура воздуха повышается. При этом, согласно уравнению (5), происходит уменьшение плотности воздуха.

Ориентировочный расход воды на охлаждение 1000 м^3 воздуха, согласно [12], определяется зависимостью

$$Q = \rho(x_2 - x_1) \cdot 1000, \quad (6)$$

где ρ – плотность воздуха; x_1 и x_2 – значения абсолютной влажности воздуха на входе в водяную завесу и выходе из нее. Например, при изменении абсолютной влажности проходящего через водяную завесу воздуха с температурой 25°C и плотностью $1,18 \text{ кг/м}^3$ (относительной – от 60 до 80 %) расход воды составит $2,71 \text{ л/ч}$ на 1000 м^3 охлаждаемого воздуха.

Таким образом, увеличение угла раскрытия свободной струи α в среднем на $3-6^\circ$ обеспечивается увеличением барометрического давления и плотности воздуха на входе в карьерное пространство. Интенсификация конвективных потоков достигается повышением внутренней энергии и уменьшением плотности воздуха на выходе из карьерного пространства. В целях снижения эксплуатационных и энергозатрат в теплый период года на подветренной стороне карьера целесообразно задействовать $\sim 1/4$ периметра трубопровода подачи холодной воды, на наветренной $\sim 1/4$ периметра трубопровода подачи горячей воды.

В холодный период года и в период атмосферных инверсий при устойчивом состоянии атмосферы необходимо создать в карьере конвективное движение и обеспечить обмен воздушных масс с внешней средой [10]. Предотвращение поступления холодного воздуха в карьер и формирование конвективных потоков обеспечивается распылением горячей воды по всему периметру верхней кромки борта (рис.1, б).

Дополнительным преимуществом распыления воды является смачивание и осаждение на земную поверхность частиц пыли, выносимых из карьерного пространства воздушными потоками, что является несомненным достоинством по отношению к использованию пылеулавливающих вентиляторов и циклонов для очистки рудничного воздуха от твердых частиц [15]. Охлаждение посредством форсуночного воздушно-испарительного способа, испытанного на шахтах Криворожского железорудного бассейна, позволило снизить температуру рудничного воздуха на $3-8^\circ\text{C}$ при значительно меньших затратах по сравнению с охлаждением воздуха холодильными машинами [8, 9].

Не стоит отбрасывать и тот факт, что осаждение пыли непосредственно по периметру карьерного пространства снижает повреждение экосреды, уменьшая образование пустошей, восстановление и комплексное освоение которых по мере отработки карьера требует значительных финансовых вложений [3, 14].

Для интенсификации конвективных потоков в карьере в летний период также целесообразно использовать солнечную энергию, отражаемую цельным (рис.2)* или разделенным на секции (рис.3)** плоским зеркалом, установленным на верхней кромке северного борта карьера.

Зеркала установлены на шарнирно-поворотной платформе 4. Наклон цельного зеркала 2 по вертикали в сторону карьерного пространства 5 и в противоположную сторону, а также поворот отражательного элемента в горизонтальной плоскости обеспечивает мачта 1, шарнирно закрепленная на платформе 4, разделенного на секции 3 и 5 зеркала – шарниры 1, закрепленные на мачте 2, установленной на платформе 4. Наклон зеркал относительно вертикальной оси и их поворот в горизонтальной плоскости обеспечивает обогрев теневых бортов и днища в течение светового дня. Наклон зеркал в дождливую погоду в сторону, противоположную карьерному пространству, обеспечивает смыв пыли, осевшей на отражательный элемент.

Разделение зеркала на секции обеспечивает более интенсивный выборочный прогрев проблемных участков поверхностей карьерного пространства и исключает ослабление конвективных потоков при их контакте с холодными теневыми поверхностями.

Под воздействием солнечных лучей, падающих на северный борт карьера под углом, близким к 90° , его поверхности в дневное время суток могут нагреваться до 50°C и выше. Солнечная радиация, отраженная плоскими зеркалами с отражательной способностью от 80 до 95 % и падающая на южный борт карьера также под углом, близким к 90° , способна нагреть его поверхность до $30\text{--}40^\circ\text{C}$ и более. Таким образом, у южного борта возрастает скорость конвективного потока, которая увеличивается с ростом температуры поверхности откоса борта карьера [2]

$$U = 0,55k_1 \sqrt{g \sin \beta (H - h) \left(\frac{t_{\text{п}} - t_{\text{в}}}{t_{\text{в}} + 0,01\Delta t H} \right)}, \quad (7)$$

где k_1 – коэффициент, учитывающий замедление потока из-за влияния уступов; g – ускорение силы тяжести; β – угол откоса борта карьера; H – глубина карьера; h – глубина расположения

Рис.2. Прогрев карьерного пространства цельным зеркалом

1 – шарнир; 2 – мачта; 3 – зеркало; 4 – платформа; 5 – карьерное пространство

Рис.3. Прогрев карьерного пространства зеркалом, разделенным на секции

1 – платформа; 2 – мачта для крепления зеркал; 3 – шарнир, обеспечивающий поворот мачты в горизонтальной и вертикальной плоскостях; 4 – верхняя секция зеркала; 5 – нижняя секция зеркала; 6 – карьерное пространство

* Патент на ПМ № 139437. Устройство для проветривания карьеров / С.Г.Шахрай, А.И.Косолапов, В.В.Коростовенко и др. Опубл. 20.04.2014. Бюл. № 11.

** Патент на ПМ № 153978. Устройство проветривания карьера / С.Г.Шахрай, А.Д.Тарасенко, М.М.Чупров и др. Опубл. 10.08.2015. Бюл. № 22.

Рис.4. Схема естественного проветривания карьера: а – при отсутствии вентиляционных траншей;

б – при наличии вентиляционных траншей

1 – карьерное пространство; 2 – откос борта карьера; 3 – ветронаправляющий щит (конфузор); 4 – вентиляционный канал; 5 – подветренный борт карьера

точки от поверхности, в которой определяется скорость воздуха; t_n и t_b – соответственно, температура поверхности откоса борта в точке карьера, расположенной на глубине h , и воздуха на поверхности Земли.

Размер используемых зеркал зависит от глубины и площади карьера. Согласно [1], с углублением горных работ в карьере его общая площадь растет, а интенсивность солнечной радиации, поступающей на единицу поверхности карьера, снижается. Для карьеров средней глубины наиболее приемлемыми представляются зеркала площадью от 10 до 50 м², для глубоких (до 100 м²) – площади, равной площади установки низкотемпературного электронагрева, размещаемой на уступах карьера [1].

Отражаемая зеркалом солнечная энергия обеспечит прогрев теневых поверхностей карьерного пространства, не создавая помех ведению технологических операций – взрывных работ и выемке полезного ископаемого. Конвективные потоки, возникающие при прогреве карьерного пространства солнечной энергией, по мере движения со дна карьера вверх дополнительно увлекают вредные вещества и пыль, выделяемые источниками, размещенными на бортах и уступах карьерного пространства.

Интенсификация естественного проветривания глубоких карьеров с помощью траншеи осуществляется направлением воздушных потоков по вентиляционному каналу, сформированному на подветренном борту карьера и выполненному с наклоном $\gamma = 16-20^\circ$ по отношению к дневной поверхности, входящему в карьерное пространство на глубину, равную $\sim 0,5$ общей глубины карьера*. Канал на уровне дневной поверхности оснащен ветронаправляющим щитом. Формирование вентиляционного канала на подветренном борту обеспечивает забор воздушных потоков и их направление непосредственно в зону рециркуляции карьерного пространства (рис.4).

Рис.5. Макет карьера, оснащенного вентиляционным каналом

Эффективность представленного способа интенсификации естественного воздухообмена проверена экспериментальным путем на макете карьера (рис.5). При изготовлении макета авторы руководствовались соображением, чтобы угол наклона его бортов превышал угол раскрытия свободной струи (в среднем 15°), осуществляющей проветривание карьерного пространства. При этом отношении размера карьера на уровне дневной поверхности в направлении движения ветрового потока к глубине менее 6, что делает карьер труднопроветриваемым [2]. В качестве

* Патент РФ № 2651666. Способ интенсификации естественного воздухообмена в глубоких карьерах / С.Г.Шахрай, Н.А.Шарова. Опубл. 23.04.2018. Бюл. № 12.

индикатора использовался дым, подаваемый по каналу или с верхней кромки борта карьера с помощью осевого вентилятора малой мощности, обеспечивающего скорость ветрового потока от 2 до 5 м/с, сопоставимую со скоростью естественных ветровых потоков на дневной поверхности. В ходе эксперимента выявлено, что направление ветрового потока по каналу уменьшает объем зоны рециркуляции на 15-20 % от общего объема карьера против 60-70 % при поступлении ветровых потоков естественным путем – с верхней кромки борта.

Выводы. Предлагаемые технические решения имеют ряд преимуществ:

- отсутствие помех при выполнении технологических операций и взрывных работ;
- распыление холодной и горячей воды интенсифицирует естественное проветривание в теплый и холодный периоды года, а также в период атмосферных инверсий, на 3-10 % уменьшает объем застойной зоны карьерного пространства, обеспечивает возможность утилизации вод, удаляемых из карьера системой водоотлива;
- интенсификация проветривания теплом, поставляемым на земную поверхность Солнцем, не требует энергоносителей, производимых из невозобновляемых источников энергии;
- интенсифицировать естественный воздухообмен в карьере с помощью ветронаправляющих каналов целесообразно в том случае, когда отработка рудного тела ведется навстречу господствующим ветровым потокам; такой подход впоследствии, по мере продвижения фронта работ, позволит уменьшить объем извлекаемой горной массы на величину, равную объему ранее прорытого вентиляционного канала;
- в развитие представленной темы требуется построение комплексной математической модели, основанной на методах вычислительной гидродинамики, с ее обязательной верификацией по данным экспериментальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бересневич П.В. Аэрология карьеров / П.В.Бересневич, В.А.Михайлов, С.С.Филатов. М.: Недра, 1990. 280 с.
2. Битколов Н.З. Проветривание карьеров / Н.З.Битколов, В.С.Никитин. М.: Госгортехиздат, 1963. 252 с.
3. Заиров Ш.Ш. Повышение эффективности пылеподавления и увеличения коэффициента полезного действия энергии ВВ при массовых взрывах на карьерах / Ш.Ш.Заиров, И.Н.Турсунова // Горный вестник Узбекистана. 2015. № 4. С. 31-34.
4. Зорин А.В. Энергетическая оценка интенсификации естественного воздухообмена в карьерах // Горный журнал. 2010. № 11. С. 85-87.
5. Конорев М.М. Вентиляция и пылегазоподавление в атмосфере карьеров / М.М.Конорев, Г.Ф.Нестеренко, А.И.Павлов. Екатеринбург: Институт горного дела Уральского отделения РАН. 2010. 440 с.
6. Конорев М.М. Исследования и перспективы создания систем вентиляции и пылегазоудаления и глубоких карьерах / М.М.Конорев, Г.Ф.Нестеренко // Горный журнал. 2012. № 1. С. 93-96.
7. Косарев Н.П. Аэродинамика вентиляционных процессов и устройств на глубоких карьерах / Н.П.Косарев, С.А.Тимухин, Ю.В.Попов. Екатеринбург: Изд-во Уральского государственного горного университета, 2009. 155 с.
8. Лапшин А.А. Охлаждение рудничного воздуха с использованием шахтных вод // Горный журнал. 2014. № 5. С. 104-107.
9. Лапшин А.А. Промышленные испытания водофорсуночного охлаждения рудничного воздуха в условиях шахты «Родина» // Проблемы охраны труда в Украине: Сборник научных трудов. Киев: Национальный НИИ промышленной безопасности и охраны труда, 2011. Вып. 20. С. 124-129.
10. Проектирование карьеров / К.Н.Трубецкой, Г.Л.Краснянский, В.В.Хронин, В.С.Коваленко. М.: Высшая школа, 2009. 694 с.
11. Развитие методов и средств проветривания глубоких карьеров / А.С.Морин, В.Д.Буткин, В.В.Кравцов, Д.Б.Нехорошев. М.: МАКС Пресс, 2004. 135 с.
12. Расчет системы охлаждения. URL: <http://www.humy.ru/munters-fcx5.shtml> (дата обращения 10.12.2018).
13. Ушаков К.З. Аэрология карьеров / К.З.Ушаков, В.А.Михайлов. М.: Недра, 1985. 272 с.
14. Skousen J. Post-mining policies and practices in the Eastern USA coal region / J.Skousen, C.E.Zipper // International Journal of Coal Science & Technology. 2014. Vol. 1. Iss. 2. P. 135-151. DOI 10.1007/s40789-014-0021-6
15. Theoretical and numerical analysis of coal dust separated by centrifugal force for working and heading faces / S.Chen, H.Wang, Y.Li, H.Cui, J.Zhao, X.Zhang // International Journal of Coal Science & Technology. 2014. Vol. 1. Iss. 3. P. 338-345. DOI: 10.1007/s40789-014-0039-9
16. Wang J. Characteristics and applications of gas desorption with excavation disturbances in coal mining / J.Wang, R.Wu, P.Zhang // International Journal of Coal Science & Technology. 2015. Vol. 2. Iss. 1. P. 30-37. DOI 10.1007/s40789-015-0060-7
17. Zhang S. Experimental study on performance of contra-rotating axial flow fan // International Journal of Coal Science & Technology. 2015. Vol. 2. Iss. 3. P. 232-236. DOI 10.1007/s40789-015-0073-2

Авторы: С.Г.Шахрай, д-р техн. наук, профессор, shahrai56@mail.ru (Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия), Г.С.Курчин, канд. техн. наук, доцент, kurchings@mail.ru (Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия), А.Г.Сорокин, канд. техн. наук, директор, Sorokin.katt@mail.ru (Красноярский автотранспортный техникум, Красноярск, Россия).

Статья поступила в редакцию 11.12.2018.

Статья принята к публикации 10.09.2019.