

УДК 622.4

Проветривание карьеров струйными вентиляторами в комплексе с устройством для аэрации

Старостин И. И.¹, Бондаренко А. В.^{1,*}

[*anymabond@rambler.ru](mailto:anymabond@rambler.ru)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Предложена схема проветривания карьеров с применением направляющего устройства для интенсификации аэрации (патент на полезную модель "Устройство для аэрации карьеров") в комплексе с карьерными вентиляторами на базе турбовинтовых авиационных двигателей. На основе моделирования и анализа результатов исследований установлены параметры и закономерности воздушных течений в карьерах, предложены расчётные зависимости скоростей течений для оценки условий и эффективности применения новой схемы вентиляции. Показано, что применение данной схемы позволяет увеличить количество воздуха, проветривающего карьер, в 8-10 раз по сравнению с одним вентилятором. И тем самым существенно понизить концентрацию вредных веществ в воздухе рабочей зоны.

Ключевые слова: открытая разработка полезных ископаемых (карьер), аэрация (организованный естественный воздухообмен) карьеров, устройство для аэрации карьеров, карьерный вентилятор, моделирование

Введение

С развитием открытой разработки полезных ископаемых, на долю которой приходится до 80 % объемов продукции, увеличиваются размеры карьеров, их глубина достигает 500-700 метров. Ведение вскрышных и добычных работ (буровзрывных, когда количество одновременно взрываемых веществ достигает сотни тонн, погрузочно-транспортных с применением мощных карьерных экскаваторов и автосамосвалов и др.) сопровождается значительным пылегазовыделением и превышением предельно-допустимых концентраций вредных веществ в воздухе рабочих зон. Растет нагрузка на окружающую воздушную среду. В последние годы отмечаются случаи образования таких аэрологических ситуаций, при которых возникает необходимость прекращения работ в карьере, что влечет за собой значительный экономический ущерб.

Ослабленная скорость ветра для большинства горнодобывающих районов страны составляет до 35% годового времени, наличие инверсионного и близкого к нему состояния атмосферы значительно затрудняет воздухообмен в выработанном пространстве и приводит к отмеченным ситуациям.

Для интенсификации естественного воздухообмена выработанного пространства авторами предложено и защищено патентом на полезную модель устройство для аэрации карьеров (УАК), представляющее наклонные профилированные лопадки на опорах, устанавливаемые стационарно или мобильно на верхней площадке подветренного борта карьера у бровки [1,2]. УАК позволяет ускорить воздушный ветровой поток в конструкциях конфузоров (лопатки - верхняя площадка подветренного борта) и изменить его направление в глубь карьера, что повышает эффективность проветривания.

Настоящая работа рассматривает использование устройства для аэрации карьеров в комплексе с карьерными вентиляторами (КВ). Схема вентиляции УАК+КВ приведена на рис.1. В качестве карьерных вентиляторов применяются установки на базе авиационных турбовинтовых двигателей.

Вопросы вентиляции карьеров изотермическими свободными и полуограниченными струями с применением КВ рассмотрены в работах [3-5]. Основное внимание в работах акцентируется на создании различных типов КВ и меньшее внимание уделяется их эксплуатации в условиях ограниченности выработанного пространства, повышению эффективности использования создаваемых ими струй. В частности, даются общие картины развития вентиляционных струй в карьерах без количественной оценки влияния технологических параметров разработки (геометрии выработанного пространства: углов наклона бортов, глубина карьера, ширина его дна и др.) на аэродинамические параметры течений. Важным моментом в работах является установление факта, что для вентиляции карьеров предпочтительными являются КВ, создающие изотермические струи, возможно, большего диаметра (расхода) и с минимальной, но достаточной для выноса загрязняющих примесей скоростью. Из устройств, повышающих эффективность струи КВ при проветривании, на вентиляторе ОВ-2 устанавливается спрямляющий аппарат раскручивающий струю и увеличивающий её дальнобойность при неизменном расходе [4].

В фундаментальных [6,9,10,11] и смежных по тематике работах [7,8] рассматриваются общие закономерности развития свободных и полуограниченных струй вблизи плоской поверхности, что отлично от развития их в условиях ограничивающего выработанного пространства карьера с различными технологическими параметрами разработки.

Совместное использование УАК и КВ для повышения эффективности воздухообмена выработанного карьерного пространства в указанных работах не рассматривалось.

Таким образом, практическое использование комбинированной схемы вентиляции УАК+КВ позволяет использовать для разбавления вредностей в рабочих зонах карьера развитую изотермическую струю КВ с большим объемом присоединенных воздушных масс, захватываемых НА и направляемых в выработанное пространство. Настилающиеся струйные течения в схеме вентиляции УАК+КВ позволяют проветривать наиболее загрязняемую прибортовую зону карьера, а небольшие по сравнению с использованием одних КВ скорости воздушных течений исключают дополнительное пылеобразование за

счет срыва пыли с поверхностей уступов. Расположение комплекса УАК+КВ на поверхности позволит также снизить уровни шума в карьере от работающего вентилятора.

Научная новизна выполненных исследований заключается в установлении как общей структуры развития воздушного течения при комбинированной схеме вентиляции УАК+КВ, так и их аэродинамических характеристиках с учетом параметров открытых горных разработок.

Предлагаемая схема воздухообмена выработанного пространства может быть использована как для интенсификации проветривания карьера, так и для его вентиляции. Полученные результаты исследования аэродинамики воздушных течений могут быть использованы при проектировании воздухообмена карьеров по предложенной схеме.

Постановка задачи

Целью работы является исследование аэродинамики воздушных течений в карьере при вентиляции по схеме УАК+КВ для установления структуры и скоростей воздушных течений, оптимального расположения КВ относительно УАК, оценки эффективности применения схемы.

Исследование проводилось путем моделирования в аэродинамической трубе при числах Рейнольдса $Re = (0,6-2,14)10^5$, что соответствует развитому турбулентному течению. Использовался критерий равенства средних скоростей воздушных течений в модели и натуре ($U_m = U_n$) при изотермическом состоянии атмосферы. Модели карьеров выполнялись в масштабе М 1:500. Моделировались карьеры глубиной $H \leq 400$ м, шириной дна $E = 100-500$ м, с углами подветренного (α_n) и наветренного (α_h) бортов $20-80^\circ$. Скорость ветрового воздушного потока измерялась термоанемометром.

Согласно ранее выполненных исследований [1,2] моделировался УАК с оптимальными параметрами: высота $H = 30$ м, ширина нижней, средней и верхней лопаток соответственно равна 20, 30, 40 м; углы их установки $\theta_{\text{опт}} \leq 40^\circ$ в зависимости от углов бортов карьеров. В качестве КВ моделировался АИ-20КВ и наиболее мощный вентилятор НК-12КВ [3].

Замеры скоростных профилей проводились как в центральной плоскости воздушных течений, так и в перпендикулярных ей плоскостях, что позволило иметь объемную картину. Картина воздушных течений в выработанном пространстве карьера исследовалась как при отсутствии ветра на поверхности (штиле), так и при его наличии. В статье приводятся результаты исследований для первого случая.

Полученные результаты

Положение КВ относительно УАК определяется аналитически из условия наиболее полного использования струи вентилятора в центральной плоскости по высоте

$$L = \frac{H + l \sin \theta_{\text{опт}} - 3kr}{k \sin \alpha} \quad (1)$$

где H - высота опоры УАК, м; l - длина верхней лопатки УАК перед опорой, м; κ - коэффициент захвата УАК струи КВ по высоте ($\kappa=0,8-0,85$); α - угол наклона верхней границы струи КВ на участке L , град.

Для установки АИ-20КВ это расстояние составляет $L=190$ м, а для НК-12КВ $L=181$ м. Методом графического интегрирования по снятым скоростным профилям воздушных течений в карьерах установлено, что при таком расположении КВ относительно УАК длиной по фронту 80 м, количество воздуха, поступающего в выработанное пространство, увеличивается по сравнению с применением одной вентиляционной установки в 8,5-9 раз и достигает $6,4 \cdot 10^3$ и 10^4 м³/с соответственно.

Известно, что турбулентные струи характеризуются следующими основными параметрами: углами расширения, распределением скоростей в сечениях и изменением максимальной скорости по длине струи. Как видно из рис. 1 и табл. 1, в центральной плоскости на всех участках наветренного борта карьера, за исключением начального L_n , где происходит поворот воздушных потоков, изменение высоты струи $b_{УАК+КВ}$ происходит по линейному закону. Разграничение пограничного слоя на струйную и прибортовую области течений происходит по оси струи в точках с максимальной скоростью в её сечении на высоте $a_{УАК+КВ}$. Исходная высота оси струи a_o и внешней её границы b_o дается в конце начального участка, длина которого составляет 2-6 высоты УАК. Развитие оси струи происходит по тому же закону, что и линии внешней границы пограничного слоя. При этом углы наклона внешней границы φ_1 и оси струи φ_2 не остаются постоянными и увеличиваются с возрастанием угла подветренного борта карьера α_n .

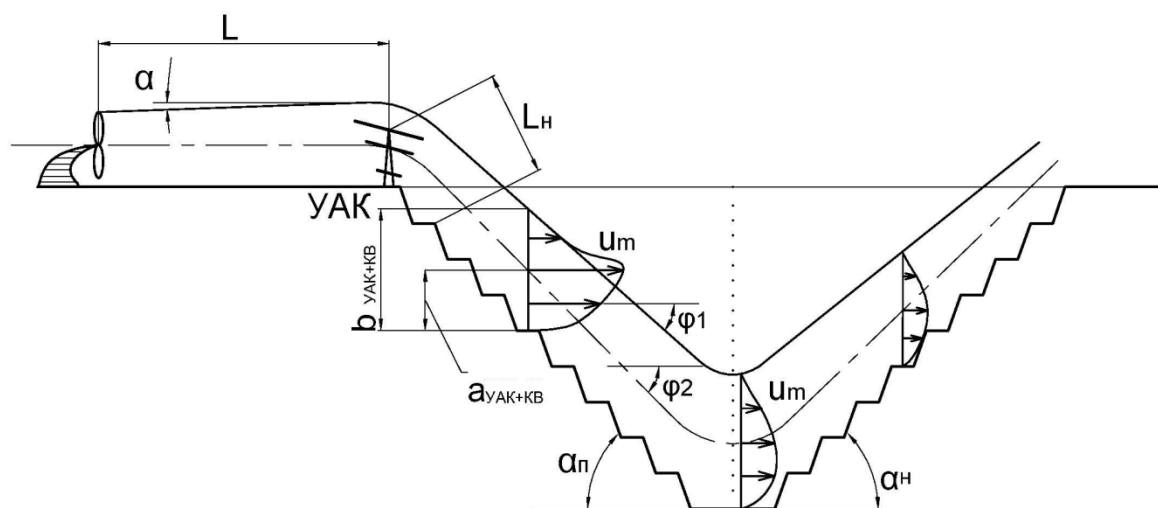


Рис.1. Вентиляция карьера по схеме УАК+КВ при штиле (центральная плоскость)

Таблица 1. Характеристики настилающихся струй схемы УАК+КВ на участке подветренного борта и дна карьера

α_n , град	φ_1 , град	φ_2 , град	L_n/H	b_o/H	a_o/H
30	27	29	2	2,25	0,67
40	34	37	4	4,10	1,02
50	35	37	6	5,65	1,75

На наветренном борту табл. 2 высота струи постепенно уменьшается и в зависимости от угла наветренного борта карьера α_n , глубины карьера, возможно, её полное вырождение.

Таблица 2. Характеристики настилающихся струй схемы УАК+КВ на участке наветренного борта карьера

α_n , град	φ_1 , град	φ_2 , град
20	18	18
30	26	26
40	26	32
50	25	33

Скоростные поля, снятые в различных сечениях центральной плоскости показывает, что распределение скоростей описывается

- для струйной области формулой Шлихтинга [3]

$$\frac{U_z}{U_m} = \left[1 - \left(\frac{Z_b}{b_{\text{УАК+КВ}} - a_{\text{УАК+КВ}}} \right)^{3/2} \right]^2, \quad (2)$$

- для прибортовой области степенным законом

$$\frac{U_z}{U_m} = \left(1 - \frac{Z_a}{a_{\text{УАК+КВ}}} \right)^{1/3}, \quad (3)$$

где Z_a и Z_b – аппликаты точек со скоростями U_z для прибортовой и струйной областей пограничного слоя соответственно, м; U_m – скорость на оси струи, м/с.

Использование для расчета осевых скоростей U_m формул В.В. Батурина, А.Я. Бахарева, В.Н. Талиева [7,8,9], полученных экспериментально применительно к струям, вытекающим из насадок различных форм, в условиях выработанного пространства карьера дают неудовлетворительные результаты. Это объясняется, во-первых, влиянием геометрии карьера и дополнительной потерей энергии в циркуляционных зонах уступов и, во-вторых, значительной неравномерностью профиля скорости при срыве с лопаток УАК.

Для определения вида зависимости $U_m = f(L, U_{m0})$ в карьерах с различной геометрией, где L – расстояние от УАК до сечения со скоростью U_m , а U_{m0} осевая скорость струи от КВ на входе в УАК рис.1, характер изменения осевой скорости, представленный в логарифмических координатах показал, что её убывание на участке подветренного борта карьера происходит по степенному закону

$$U_m = AL^{-B}U_{m0}. \quad (4)$$

Значения коэффициентов A и B зависят от угла наклона борта карьера и определяются зависимостями

$$A = 0,373\alpha_{\pi} + \frac{43,7}{\alpha_{\pi} - 27,5} - 15,8, \quad (5)$$

$$B = 0,0265\alpha_{\pi} + \frac{7,45}{\alpha_{\pi} - 22,6} - 0,82. \quad (6)$$

Обращает на себя внимание то обстоятельство, что для $\alpha_{\pi} = 40^\circ$ убывание U_m происходит медленнее, чем для $\alpha_{\pi} \leq 30^\circ$. Случай $\alpha_{\pi} = 50^\circ$ занимает промежуточное положение. Подобная зависимость осевой скорости от угла наклона борта объясняется двумя причинами: большей потерей энергии в циркуляционных зонах уступов и уменьшением поверхности эжекции, а, следовательно, увеличением стабилизирующего действия поверхности борта на течение при малых α_{π} .

Изменение осевой скорости для участка наветренного борта описывается линейной зависимостью

$$U_m = U_{mB} - D(L - L_B), \quad (7)$$

где U_{mB} — осевая скорость в сечении, проходящем через нижнюю бровку наветренного борта и определяемая зависимостями (4)-(6), м/с; L_B — расстояние от УАК до нижней бровки подветренного борта, м; D — коэффициент, зависящий от угла наклона наветренного борта карьера, $D = (6,43\alpha_{\pi} - 37,5)10^{-5}$.

Увеличение ширины пограничного слоя в поперечном направлении происходит более интенсивно, чем её высоты. Углы расширения струи в поперечном направлении для $\alpha_{\pi} = 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$ на уровне оси струи и плоскости борта и дна карьера составляют соответственно $32-33^\circ, 26-30^\circ, 22-29^\circ$. Быстрое нарастание размеров струй по фронту движения позволяет проветривать значительную часть карьера.

Исследования профилей скоростей в различных горизонтальных сечениях поперечных плоскостей показали, что они удовлетворительно описываются формулой «трех вторых» Шлихтинга [6].

Заключение и выводы

Анализируя на основании полученных зависимостей схему вентиляции УАК+КВ применительно к карьерам с $\alpha_{\pi} = \alpha_n$ и шириной дна $E = 100\text{ м}$ при условии, что минимальная скорость выноса вредностей из карьера составляет 0,5 м/с, следует отметить, что при использовании вентилятора НК-12КВ условия выноса вредностей могут быть достигнуты при глубине выработанного пространства до 65 м ($\alpha_{\pi} = 30^\circ$) и 80 м ($\alpha_{\pi} = 40^\circ$). С увеличением глубины карьера его вентиляция будет осуществляться только за счет разбавления вредностей без выноса их струей.

Из выше приведенного анализа следует, что использование схемы вентиляции УАК+КВ при штиле целесообразно в карьерах, где применение УАК обусловлено необходимостью интенсификации естественного воздухообмена, для ликвидации преимущественно эпизодических загрязнений путем разбавления вредных примесей. Учитывая, что увеличение количества воздуха, поступающего в карьер при схеме вентиляции УАК+КВ, связано с повышением его теплосодержания, применение указанной схемы при сформировавшейся инверсии позволит также сократить время её ликвидации.

Таким образом, по результатам выполненных исследований предложена комбинированная схема проветривания карьеров с применением направляющего устройства для интенсификации аэрации (патент на полезную модель Устройство для аэрации карьеров № 118687 РФ) в комплексе с карьерными вентиляторами на базе турбовинтовых авиационных двигателей АИ-20КВ и НК-12КВ, позволяющая увеличить количество воздуха, поступающего в выработанное пространство, по сравнению с применением одной вентиляционной установки в 8,5-9 раз.

Исследования аэродинамики воздушных течений в выработанном пространстве карьеров различной геометрии с применением этой схемы в условиях штиля позволило выявить закономерности развития течений, предложить расчётные зависимости скоростей течений для оценки условий и эффективности применения предложенной схемы вентиляции.

Список литературы

1. Старостин И.И., Ксенофонтов Б.С., Бондаренко А.В. Капитонова С.Н. Устройство для аэрации карьеров: пат. на полезную модель 118687 РФ. 2012. 4 с.
2. Старостин И.И., Бондаренко А.В. Интенсификация аэрации карьеров с применением направляющих устройств // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 6. С. 63-70. DOI: [10.7463/0613.0577364](https://doi.org/10.7463/0613.0577364)
3. Филатов С.С. Исследование способа и разработка средств искусственной вентиляции карьеров: дис. ... докт. техн. наук. Свердловск, 1973. 240 с.
4. Павлов А.И. Исследование и разработка средств местного проветривания карьеров: дис. ... канд. техн. наук. Свердловск, 1971. 175 с.
5. Вершинин А.А. Аналитические и экспериментальные исследования искусственного проветривания карьеров свободными струями: дис. ... канд. техн. наук. Свердловск, 1966. 167 с.
6. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя: пер. с нем. М.: Наука, 1974. 712 с.
7. Абдюшев А.Я., Бахарев В.А., Фёдорова Л.В. Экспериментальные исследования турбулентных струй, развивающихся вблизи плоской поверхности. Труды Казанского инженерно-строительного института. Вып. 7. Казань, 1968. 174 с.
8. Талиев В.Н. Аэродинамика вентиляции. М.: Стройиздат, 1979. 295 с.

9. Батурин В.В. Основы промышленной вентиляции. М.: Профиздат, 1990. 448 с.
10. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. М.: Эколит, 2011. 715 с.
11. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003. 846 с.

Jet Fans Airing Quarries in Combination with a Device for Aerating

I.I. Starostin¹, A.V. Bondarenko^{1,*}

[*anymtabond@rambler.ru](mailto:anymtabond@rambler.ru)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: open pit mining (open pit), aeration (organized by natural ventilation) quarries, device for aeration of pits, career fan, simulation

Relevance of study is caused by the search for effective schemes and devices to intensify air exchange of open pits, which is, substantially, worsen with increasing depth of pits and intensity of mining operations. To implement air exchange of pits the scheme of ventilation with simultaneously used device for aeration of pits (DAP) is offered. DAP represents the inclined profiled blades on the support, which are set on the top platform of the pit leeside near the edge (patent-protected useful DAP model) and based on the turbo-propeller aviation engines pit fan (PF) before it. The associated works in the field concerned consider general development factors of free and semi-limited jets, being developed near a flat surface that is different from their development in the conditions of limiting quarry out space with various parameters (overall slope angles, depth, benches at the edges, etc.). The work objective was to study and define the structure and optimal arrangement of PF in respect to DAP and estimate efficiency of using DAP+PF scheme through modelling in a wind tunnel by criterion of average speed of aerial currents in the pit, using a DAP+PF scheme of ventilation.

Features of development of aerial currents in pits with various parameters are analysed. Consistent patterns of speed distribution of in semi-limited jet currents are determined. It is proved that the air amount involved in air exchange increases by 8-10 times in comparison with the case with one PF used. The offered air exchange scheme of the quarry out space can be used both for an intensification of airing pit, and for its ventilation. The received study results of aerial current aerodynamics can be used in designing air exchange of pits according to the offered scheme.

References

1. Starostin I.I., Ksenofontov B.S., Bondarenko A.V., Kapitonova S.N. *Ustroistvo dlia aeratsii kar'erov* [Device for aeration pits]. Utility patent RF, no. 118687 RF. 2012. (in Russian).

2. Starostin I.I., Bondarenko A.V. Intensification of aeration of pits with the use of guiding devices. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Bauman* = *Science and Education of the Bauman MSTU*, 2013, no. 6, pp. 63-70. DOI: [10.7463/0613.0577364](https://doi.org/10.7463/0613.0577364) (in Russian).
3. Filatov S.S. *Issledovanie sposoba i razrabotka sredstv iskusstvennoy ventilyatsii kar'erov*. Dokt. dis. [Research of method and development of means of artificial ventilation of quarries. Dr. dis.]. Sverdlovsk, 1973. 240 p. (in Russian).
4. Pavlov A.I. *Issledovanie i razrabotka sredstv mestnogo provetrivaniya kar'erov*. Kand. dis. [Research and development of means of local ventilation of quarries. Cand. dis.]. Sverdlovsk, 1971. 175 p. (in Russian).
5. Vershinin A.A. *Analiticheskie i eksperimental'nye issledovaniya iskusstvennogo provetrivaniya kar'erov svobodnymi struyami*. Kand. dis. [Analytical and experimental studies of artificial ventilation of quarries by free jet. Cand. dis.]. Sverdlovsk, 1966. 167 p. (in Russian).
6. Shlikhting G. *Teoriia pogrannichnogo sloia* [Theory of boundary layer]. Transl. from German. Moscow, Nauka Publ., 1974. 712 p.
7. Abdyushev A.Ya., Bakharev V.A., Fedorova L.V. *Eksperimental'nye issledovaniya turbulentnykh struy, razvivayushchikhsya vblizi ploskoy poverkhnosti. Trudy Kazanskogo inzhenerno-stroitel'nogo instituta. Vyp. 7* [Experimental studies of turbulence jets emerging near a flat surface. Proceedings of the Kazan Institute of Civil Engineering. Vol. 7]. Kazan, 1968. 174 p. (in Russian).
8. Taliev V.N. *Aerodinamika ventilyatsii* [Aerodynamics of ventilation]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1979. 295 p. (in Russian).
9. Baturin V.V. *Osnovy promyshlennoy ventilyatsii* [Fundamentals of Industrial Ventilation]. Moscow, Profizdat Publ., 1990. 448 p. (in Russian).
10. Abramovich G.N. *Teoriya turbulentnykh struy* [The theory of turbulent jets]. Moscow, Ekolit Publ., 2011. 715 p. (in Russian).
11. Loitsianskii L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid mechanics]. Moscow, Drofa Publ., 2003. 846 p. (in Russian).