

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОВЕТРИВАНИЯ ГЛУБОКИХ АЛМАЗНЫХ КАРЬЕРОВ СМЕРЧЕОБРАЗНЫМИ ВИХРЯМИ

И. И. Ковлеков

Горный институт, Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова,  
Якутск, Россия, kovlekov@mail.ru

**Аннотация:** с увеличением глубины открытой разработки месторождений усложняются условия проветривания карьера. Сезонное понижение температуры атмосферного воздуха в условиях Крайнего Севера непременно сопровождается повышением загазованности рабочего пространства и часто приводит к вынужденным простоям работы карьера. Одним из альтернативных и перспективных направлений решения проблемы проветривания глубоких карьеров может стать использование естественных природных метеорологических факторов в сочетании с потенциалом искусственно созданных смерчеобразных вихревых потоков. Вопросы создания условий управляемого локального смерча в пространстве воронкообразного карьера, характерного для алмазных месторождений, представляют научно-практическое значение для решения проблем снижения загазованности и запыленности застойных зон глубокого карьера. Поставленная задача интенсификации вентиляции глубокого карьера рассмотрена с двух противоположных сторон: со стороны дневной поверхности — максимально эффективное направление и использование естественных воздушных потоков для понижения границы естественного проветривания, и со стороны дна карьера — обеспечение управляемого восходящего вихревого вентиляционного потока для выдачи загазованного воздуха в зону досягаемости потоков естественного проветривания. Предложены технические решения, совместная работа которых в совокупности обеспечивает повышение эффективности проветривания наиболее загрязненных горизонтов в нижней части карьера путем создания и обеспечения устойчивости вертикального вихревого вентиляционного столба, геометрические и динамические параметры которого можно контролировать и управлять ими.

**Ключевые слова:** карьер, алмазное месторождение, загазованность карьера, проветривание карьера, вихревые потоки, смерч, торнадо.

**Для цитирования:** Ковлеков И. И. Интенсификация проветривания глубоких алмазных карьеров смерчеобразными вихрями // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 5–2. — С. 124–135. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_52\_0\_124.

### Intensification of airing of deep open-pit diamond mine by tornado-like vortices

I. I. Kovlekov

Mining Institute, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia, kovlekov@mail.ru

**Abstract:** The conditions for airing the open pit mine become more deteriorate by an increase of the final depth of open-pit mining. A seasonal winter drop of atmospheric air temperature at the Far North is steadily accompanied by an increase of the gas contamination of the working locations and progressively leads to unwanted downtime of mining. One of the alternative and promising brainchild for solving the problem of ventilation of deep open pits can be the use of natural meteorological factors in combination with the potential ability of artificially created tornado-like vortex currents. The issues of creating conditions for a controlled local tornado in the space of a funnel-shaped open pit, typical for the diamond mining, are important for scientific and practical reasons for solving the problems of reducing gas and dust pollution in stagnant zones of the deep open pit mine. The set task of improving the ventilation efficiency in the volume of space of the deep open pit is considered from the standpoint of two sides of opposite positions: from the side of the surface – the most efficient guide and use of natural wind flows to lower the natural air ventilation boundary, and from the side of the pit bottom – to provide a controlled upward vortex ventilation flow for the release of polluted air into zone of reach of natural wind ventilation streams. Technical solutions are proposed, the joint work of which together provides an increase in the efficiency of ventilation of the most polluted horizons in the lower part of the open pit by creating and ensuring the stability of a vertical vortex ventilation column, the geometric and dynamic parameters of which can be monitored and controlled

**Key words:** open pit mine, diamond deposit, gaseous contaminants, open pit ventilation, vortex flows, whirlwind, tornado.

**For citation:** Kovlekov I.I. Intensification of airing of deep open-pit diamond mine by tornado-like vortices. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(5–2):124–135. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_52\_0\_124.

---

## **Введение**

Разработка месторождений полезных ископаемых открытым способом производится разрушением породного массива и перемещением огромной массы горных пород, технологические процессы которого сопровождаются интенсивным выделением газов и пыли в рабочем пространстве карьера [1]. Для неглубоких карьеров и угольных разрезов безопасные условия атмосферы обеспечиваются преимущественно методами естественного проветривания. Углубление карьера, увеличение отношения его размеров на поверхности к глубине, особенности формы в плане и неблагоприятное расположение к направлениям господствующих ветров приводит к необходимости разработки дополнительных мероприятий для реализации методов искусственного проветривания [2]. Для коренных алмазных месторождений условия проветри-

вания значительно усложняются вследствие равнинного рельефа на дневной поверхности и воронкообразной формы карьера, что значительно снижает предельную глубину зоны естественного проветривания [3]. Особенно острой становится проблема проветривания карьера на Арктическом Севере в зимний период, когда высокий уровень загазованности и запыленности рабочего пространства приводит к продолжительным простоям карьера вследствие температурной инверсии [4].

## **Методы вентиляции глубоких карьеров**

Разработано немало способов и устройств для проветривания глубоких карьеров, направленных на снижение загрязненности атмосферы и обеспечение необходимых санитарных норм на рабочем месте [5]. Наиболее востребованным направлением изы-

сканий является искусственная вентиляция карьера в нижних горизонтах при помощи мощных вентиляционных установок в сочетании различных схем и режимов работы вентиляционной сети. Большинство предложенных исследователями технических решений проветривания глубоких карьеров можно условно разделить на два направления по методу организации вентиляционных потоков: 1) — с использованием вентиляционных трубопроводов/воздуховодов, и 2) — проветривание свободными вентиляционными струями без использования последних. К первому направлению изысканий можно отнести следующие оригинальные технические решения по вентиляции карьера при помощи аэростатов и надувных воздуховодов. Так, в работе [6] предложено проветривание глубокого карьера через гибкую трубу мобильной вентиляционной установки, подвешенной на аэростате с гондолой. А в установке для проветривания глубокого карьера [7] аэростат выполнен в виде тороида, во внутреннем кольце которого размещен турбовинтовой двигатель, а нижний конец воздуховода снабжен изогнутым воздухозаборником. Аэродинамическая система для направления восходящих потоков в карьере [8] предложена в виде технического комплекса из вертикально или наклонно ориентированного набора торообразных элементов различного диаметра и емкости, соединенных с источником сжатой рабочей среды из гелия. Обеспечение воздухообмена между атмосферой карьера и окружающей средой для вентиляции карьера в работе [9] предложено осуществить использованием надувных плавучих воздуховодов. Внедрение и практическая реализация вышеприведенных технических идей вызывают много вопросов при соотношении их с огромными размерами действующих глубоких карьеров, а также

в связи со сложностью монтажа конструкций и эксплуатации их в реальных условиях активного воздействия природных и техногенных факторов. Разработки по второму направлению более широко апробированы в многолетней практике горного производства и пригодны к практической реализации — как по устройствам и установкам вентиляции, так и по методам проветривания карьеров [10, 11]. Однако за последние несколько десятилетий развития высокотехнологического горного оборудования и техники в этом направлении не появились альтернативные варианты принципиально новых технических решений, отвечающих современным вызовам, на фоне нарастающего ухудшения состояния атмосферы глубоких карьеров по мере их реконструкции и закономерного развития в глубину [12].

Способы проветривания карьера свободными вентиляционными струями являются наиболее пригодными для специфических особенностей ведения открытых горных работ, которые характеризуются интенсивным движением технологического транспорта, проведением массовых взрывов и динамически меняющейся обстановкой в рабочей зоне карьера. Автономность и мобильность вентиляционных установок, возможность оперативного регулирования их количества и расположения в пространстве карьера, широкий выбор различных методов вентиляции карьера по каскадной, параллельной и комбинированным схемам работы системы вентиляторов определяют их преимущества при обосновании и выборе рационального варианта проветривания карьера. Однако для больших и глубоких карьеров они становятся неэффективными как по техническим возможностям, так и по чрезмерному энергопотребле-

нию [12]. Для алмазных месторождений на Севере ситуация значительно хуже — она осложнена инверсионным состоянием атмосферы в рабочей зоне вследствие стекания и скапливания холодного воздуха на дне воронкообразного карьера [13]. В таких условиях сильнее проявляются слабые стороны методов формирования вентиляционных потоков свободными струями из-за роста удельных энергозатрат беструбных вентиляционных систем [15] и падения дальнобойности вентиляционных установок, и, как следствие, разрушение застойного инверсионного слоя атмосферы карьера становится непреодолимой проблемой [14].

Основными причинами неэффективности формирования вентиляционных потоков свободными струями являются большие потери кинетической энергии вентиляционной установки на паразитные турбулентные вихри вокруг факела струи и его нарастающее раскрытие, вовлекающее все новые массы воздуха в турбулизацию. При этом падение максимальной скорости струи вдоль продольной оси потока происходит по крутой гиперболической зависимости. Увеличение мощности вентилятора не меняет качественную картину непроизводительных потерь энергии, затраченной на её диссипационное рассеивание в атмосфере карьера. Следовательно, перемещение загрязнённого воздуха свободными вентиляционными потоками по протяженной траектории из глубокого карьера на дальние расстояния является крайне энергозатратным мероприятием.

### **Интенсивные атмосферные вихри, смерч и торнадо**

Существует ли другой способ транспортировки/переноса большого объёма загрязнённой воздушной массы без потерь на большие расстояния без тру-

бопровода? С одной стороны, вопрос, кажется, не имеет положительного ответа, потому что на сегодняшний день не существует такого технического устройства, пригодного для реализации подобного предложения. С другой стороны, в природе наблюдаются такие естественные (но уникальные) газодинамические процессы, как интенсивные атмосферные вихри в виде восходящих по спирали воздушных потоков — пылевые вихри, смерч, торнадо и тропический циклон. В восходящем вихревом столбе смерч-торнадо (рис. 1) может поднять огромную массу воды с водоема вместе с обитателями до уровня облаков без видимых потерь скорости вращения вихря [16]. Самый парадоксальный аспект этого природного феномена заключается в компактности тела торнадо и отсутствии турбулентных вихрей вокруг восходящего столба: поверхность раздела между телом скоростного вихревого потока и неподвижной воздушной средой составляет в толщину всего до одного метра даже у мощных торнадо с диаметром до 300 м [17]. И при этом расстояние транспортировки воздушных масс по столбу может составлять в высоту до 3—4 км. В сущности, имеет место способ транспортировки воздушных масс на удалённое расстояние без ограничивающей поток твердой поверхности — стенок трубопровода.

Интенсивные атмосферные вихри как объект научного изучения привлекают пристальное внимание ученых разных специальностей достаточно давно [17]. Документирован большой объем фактографических данных и натурных наблюдений, детально изучены физическая природа явления и механика динамических процессов движения потока [18]. Разработаны математические модели для прогноза различных параметров газодинамического про-



*Рис. 1. Водяной смерч у побережья Пунта-Горда (Флорида): <https://en.wikipedia.org/wiki/Waterspout>*

*Fig. 1. Water tornado off the coast of Punta Gorda (Florida): <https://en.wikipedia.org/wiki/Waterspout>*

цесса восходящего закрученного потока [19] и проводятся экспериментальные работы по генерации управляемых торнадо-смерчей в лабораторных условиях как у нас в стране [20], так и за рубежом [21]. Наиболее интересными прикладными идеями применительно к теме настоящей статьи являются работы по контролю, формированию и управлению искусственно создаваемым торнадо для различных полезных обществу задач. Для использования энергии восходящих смерчеобразных вихрей поданы заявки на изобретение в патентные ведомства США [22] и Великобритании [23], в которых предложены оригинальные технические приложения искусственно созданного торнадо.

### **Проветривание карьера смерчеобразными вихрями**

Сравнительная оценка диапазона физических параметров смерчей-торнадо показывает вполне соразмерные показатели для условий проветривания алмазных карьеров. Если диапазон вариации предельной проектной глубины

карьера на данный момент составляет от 400 до 800 м, то высота природных смерчей-торнадо начинается от нескольких сот метров до десятка километров, а диаметр восходящего столба смерча-торнадо, по оценке специалистов, варьирует от десятка до нескольких сотен метров, что вполне соответствует предельным размерам дна алмазного карьера: от 100 до 200 м. Объёмы переносимого при этом смерчем-торнадо воды и воздуха составляют десятки миллионов кубов, что вполне соразмерно с объёмом воздуха, заключённого в пространстве карьера или в запертой его части инверсионной зоны.

Рассмотрим один из вариантов возможной практической реализации смерчеобразного вихря для проветривания карьера. Исходя из физической модели явления и допуская, что главными факторами формирования устойчивого восходящего вихря являются закручивание потока и вертикальная тяга, составим концептуальную схему формирования смерчеобразного вихря в пространстве карьера доступными техническими средствами. Формирование восходящего вихревого вентиляционного канала возможно расстановкой установок вентиляции по кругу на рабочей площадке карьера и направлением факелов вентиляционных струй в центральную часть рабочей зоны под углом по касательной для закручивания вихревого столба у основания по периметру направленными потоками воздуха [24]. Диаметр вихревого вентиляционного столба регулируют, меняя угол атаки направления осей вентиляционных установок относительно вертикальной оси столба. Варьирование угла атаки осей вентиляционных струй относительно вертикального вихревого столба по горизонтали и вертикали обеспечивает рациональный выбор оптимальной величины диаметра вихревого столба для управления

геометрическими и динамическими показателями вихревого столба. Формирование подъемной силы в потоке внутри него осуществляется нагреванием и увлажнением воздуха, что создает вертикальную тягу за счет разности плотности нагретой вентиляционной струи относительно плотности окружающего холодного воздуха. Формирование нагретой высокоскоростной вентиляционной струи возможно при горении жидкого или газообразного горючего топлива в некоторых типах вентиляционных установок на базе реактивных двигателей. Нагрев восходящего вентиляционного канала более доступным способом можно осуществить сжиганием горючих материалов у основания вихревого столба, а увлажнение — либо подачей горячего пара, либо генерацией пароводяного тумана установками для подавления пыли.

### **Проветривание карьера в условиях Крайнего Севера**

В качестве конкретного примера рассмотрим типичную задачу по проветриванию карьера кимберлитового месторождения алмазов в условиях Арктического Севера на этапах открытой разработки горизонта ниже 200—300 м. Температура воздуха зимой в этих широтах часто опускается ниже минус 50° С, а понижение показателя максимального влагонасыщения приводит к предельно высокой плотности воздуха. Происходит заполнение нижележащего пространства карьера более плотными массами холодного воздуха и, как следствие, в нижней узкой воронке карьера в рабочем пространстве ухудшаются условия загазованности и запыленности (рис. 2). Начиная с момента углубления рабочего горизонта горных работ ниже зоны естественного проветривания (11) и рециркуляции (12) простои горных работ

из-за превышения предельных показателей загазованности и запыленности растут стремительно. Продолжительные простои горных работ по причине ухудшения атмосферы карьера наблюдаются в холодный период года, начиная с октября-ноября, и убывают только в весеннее время. В реальных условиях эксплуатации карьера простои в работе предприятия превышают 2000 и более часов в год [15].

Для проветривания карьера в качестве вентиляционных установок можно выбрать вентиляторы местного проветривания с регулируемой частотой скорости вращения лопастей. Количество и расположение вентиляторов определяют с учетом необходимого объема воздухообмена и допустимой продолжительности проветривания. Вентиляторные установки 4 (рис. 2) размещают по окружности контура 3 на расстоянии в пределах радиуса дальнобойности установок. Вектор вентиляционного факела 5 каждой установки направляют в сторону центра рабочей площадки по касательной к линии окружности 6. Запускают в работу вентиляторные установки, стремительные воздушные потоки которых создают восходящий вихревой столб 7 за счет закрутки его по периметру факелами вентиляционных струй 9. Пушки (Fog Cannon) пароводяного тумана 8 распределяют между вентиляторными установками. Вентиляторы можно установить в направлении круга с наклоном вверх для дополнительного усиления вертикального вектора тяги. В центральной части круга вихревого столба 7 устанавливают специализированные тепловые источники: метеотроны, реактивные авиационные двигатели, или устраивают сжигание горючих материалов. Нагрев воздушных потоков в пламени поднимает его температуру до 300 градусов и выше. Направленные потоки воздуха и их

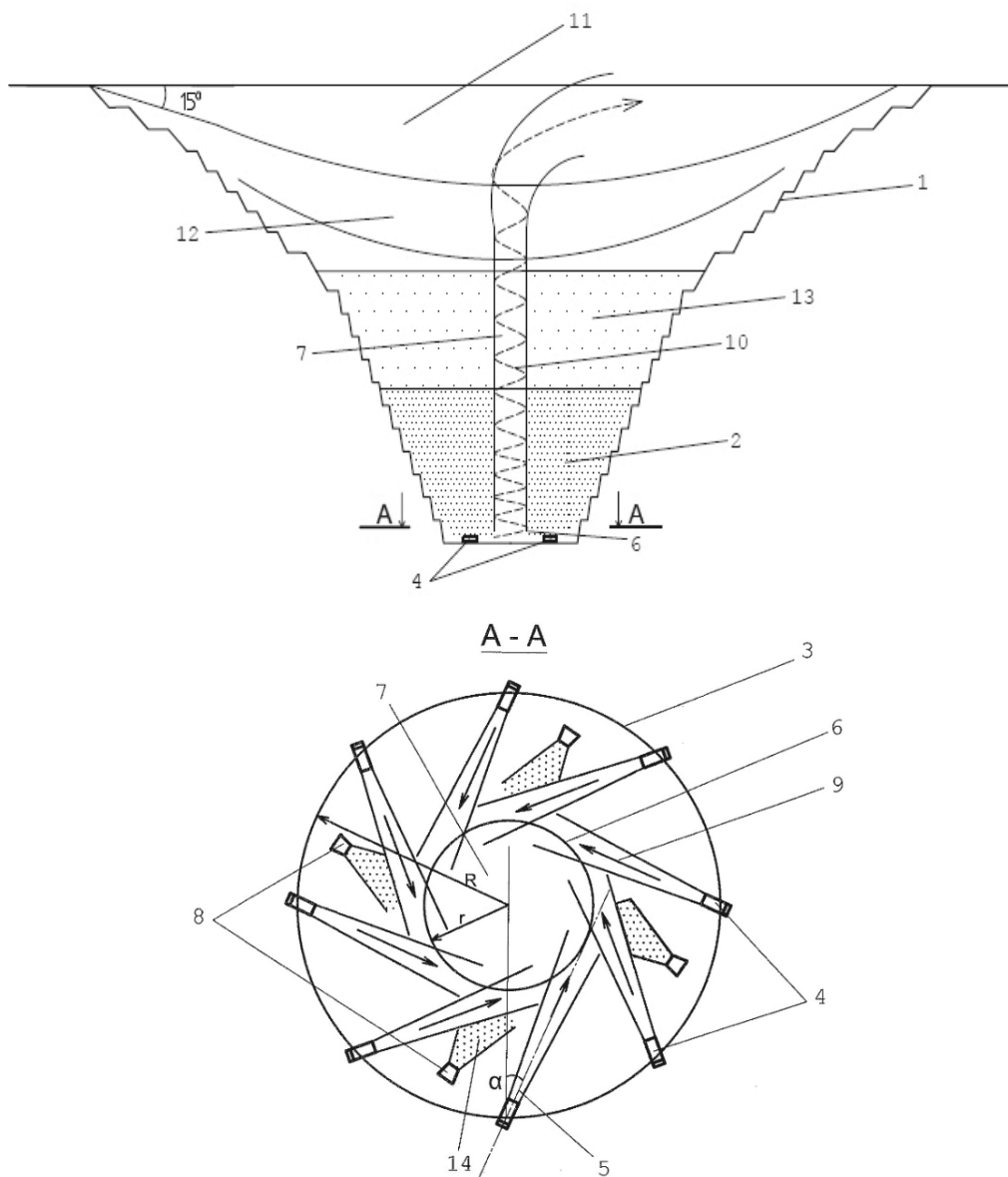


Рис. 2. Принципиальная схема проветривания карьера [24]: 1 – контур карьера; 2 – рабочая зона; 3 – круговой контур; 4 – вентиляционные установки; 5 – вектор вентиляционной струи; 6 – основание вихревого столба; 7 – вихревой столб, 8 – пушки пароводяного тумана; 9 – факел вентиляционной струи; 10 – спирали восходящего вихря; 11 – зона ветровой активности; 12 – зона рециркуляции; 13 – инверсионная пробка; 14 – факел парогенератора;  $\alpha$  – угол атаки

Fig. 2. Schematic diagram of the quarry ventilation [24]: 1 – the contour of the quarry; 2 – the working area; 3 – the circular contour; 4 – ventilation installations; 5 – the vector of the ventilation jet; 6 – the base of the vortex column; 7 – the vortex column, 8 – steam mist guns; 9 – the flare of the ventilation jet; 10 – spirals of an ascending vortex; 11 – wind activity zone; 12 – recirculation zone; 13 – inversion plug; 14 – steam generator torch;  $\alpha$  – angle of attack

закручивание вокруг источника пламени провоцируют искусственный огненный вихрь, который значительно увеличивает высоту и вертикальную тягу огненного смерча. Резкая разница температуры внутри вихревого столба и воздуха снаружи кардинально усиливает его вращение, формируя устойчивый восходящий вихревой столб. Для подогрева и увлажнения вентиляционной струи можно применить потоки горячего или перегретого пара. Восходящий вихревой столб создает зону пониженного давления для подсоса загазованного воздуха из нижней зоны и переносит его в область верхней зоны с относительно пониженным давлением из-за ветровой активности и рециркуляции.

### **Интенсификация естественного проветривания карьера**

Для поддержания устойчивого непрерывного восходящего вихревого потока, когда размеры и высота вихревого столба достигают значительных величин, необходимо создание дополнительной тяги в верхней части столба. В природных атмосферных вихрях, таких как смерч и торнадо, источником такой тяги служит суперячейка — огромная масса вращающихся кучевых облаков в виде мезоциклона [16]. Формирование вращающейся воздушной массы в верхней части карьера способствует понижению нижней границы естественного проветривания, а также создает зону пониженного давления. Понижение давления в проветриваемой верхней части карьера может служить дополнительным источником тяги для вывода вентиляционных потоков из застойной зоны через восходящую вихревую колонку.

Создание вращающихся воздушных масс (искусственного «циклона») в верхней части карьера можно осуществить следующим образом. Основная

идея технического решения [25] заключается в использовании любой ветровой активности на дневной поверхности путем направления воздушных потоков не к центральной зоне карьера, как предложено в работах [26], а тангенциально относительно окружности воронки по касательной вдоль борта карьера для создания воздушного круговорота в пространстве карьера. Для этой цели изменяют аэродинамический рельеф прикарьерной поверхности путем целенаправленного формирования вскрывных отвалов в качестве ветронаправляющих сооружений на пути движения воздуха в виде сужающихся спиральных каналов по сторонам света. Дополнительно, как дефлекторы, для усиления эффекта перехвата ветровой активности можно использовать ветронаправляющие щиты или экраны, сопрягая их направляющие поверхности с направлениями бортов капитальных траншей и полутраншей. При этом поперечный профиль направляющей поверхности отвала целесообразно выполнить в форме вертикальной подпорной стенки или в виде ступенчатого профиля для снижения потерь набегающих потоков огибанием отвала через ее гребень. Для возведения вертикального или ступенчатого профиля откоса можно использовать габионы или подпорные блоки известных конструкций, а также ветронаправляющие щиты или экраны непосредственно на уступах ярусов отвалов. Предложенный комплекс поверхностных профилирующих рельеф сооружений для интенсификации режима аэродинамики атмосферы карьера позволит аккумулировать энергию ветровой активности, замыкая потоки в пространстве карьера в виде локального искусственного вентиляционного циклона. Уменьшение поперечного сечения сужающихся каналов пропорционально увеличит скорость потока



на входе в пространство карьера. Здесь речь не идет о дополнительных объемах работ по перемещению или переэкскавации вскрышных пород с уже складированных отвалов и переформированию из них ветронаправляющих профилей рельефа, что привело бы значительным и неоправданным финансовым издержкам. Принимая во внимание результаты прогноза по ухудшению состояния атмосферы карьера в нижних горизонтах, заблаговременно рассматривается необходимость учета местных ветровых условий при планировании отвальных работ, а при складировании вскрышных пород — формирование из них заданных ветронаправляющих элементов рельефа.

Таким образом, предложенные выше технические решения в совокупности обеспечивают повышение эффективности проветривания глубоких застойных зон в пространстве карьера путем создания и обеспечения устойчивости вертикального вихревого вентиляционного столба, геометрические и динамические параметры которого можно контролировать и управлять ими. Понижение границ зоны естественного проветривания при этом достигается путем интенсификации естественного воздухообмена с максимальным использованием энергии движения воздуха на поверхности при любом направлении ветра с минимальными потерями за счет использования геометрии воронкообразного карьера и создания спиральной траектории движения потока. Совокупность предложенных направлений поиска решений проблемы проветривания глубоких карьеров направлена на повышение безопасности ведения горных работ на нижних горизонтах и снижение простоев в ведении горных работ в условиях загазованности и запыленности рабочего пространства алмазных карьеров на Севере.

## **Заключение**

Проблема проветривания алмазных карьеров не потеряла свою актуальность и сегодня, несмотря на долгую историю поиска различных методов естественного проветривания и искусственной вентиляции. Постоянная тенденция к снижению предельной глубины открытых горных работ выдвигает на первый план приоритетных задач необходимость изыскания более эффективных методов управления состоянием атмосферы карьера на глубоких горизонтах. Основная задача технического решения, приведенного в статье, направлена на решение проблемы снижения загазованности и запыленности застойных зон глубокого карьера в условиях Крайнего Севера, когда сезонное понижение температуры атмосферного воздуха приводит к ухудшению условий работы и увеличению вынужденных простоев работы карьера. В работе представлен концептуальный подход к решению данной сложной проблемы, основная идея которого заключается в реализации совместной работы общекарьерного способа естественного проветривания с вентиляционной схемой местного проветривания как единой системы проветривания карьера в целом путём использования феномена интенсивных атмосферных вихрей, подобных смерчу и торнадо. Для интенсификации проветривания глубокого карьера предложено согласованное взаимодействие зоны естественного проветривания в верхней части с нижней частью воронки в рабочей зоне через колонну смерчеобразного вихря в качестве вентиляционного канала для выдачи загазованного воздуха.

## **Конфликт интересов**

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Luo H., Zhou W., Jiskani I. M., Wang Z.* Analyzing Characteristics of Particulate Matter Pollution in Open-Pit Coal Mines: Implications for Green Mining // MDPI, *Energies*. 2021, vol. 14, iss. 9, 19 p. DOI: 10.3390/en14092680.
2. Evaluating the Air Flow and Gas Dispersion Behavior in a Deep Open-Pit Mine Based on Monitoring and CFD Analysis: A Case Study at the Coc Sau Open-Pit Coal Mine (Vietnam). N. V. Duc, C. Lee, X.-N. Bui and other // Proceedings of the International Conference on Innovations for Sustainable and Responsible Mining, October, 2020, pp. 224–244. DOI: 10.1007/978–3–030–60839–2\_12.
3. *Choudhury A., Vandopadhyay S.* The Effect Of Velocity On The Dispersion Of Pollutants In A Hypothetical Arctic Open-pit Mine // Proceedings of the 24th International Conference on Modelling, Monitoring and Management of Air Pollution (AIR 2016), 20–22 June 2016, Crete, Greece. WIT Transactions on Ecology and the Environment. WIT Press. 2016, vol. 207, pp. 35–45.
4. *Tukkaraja P., Keerthipati M., French A.* Simulating temperature inversions in surface mines using computational fluid dynamics // Proceedings of the South Dakota Academy of Science . 2016, vol. 95 pp. 119–124.
5. *Тимофеева Ю. В., Суксова С. А., Долган А. А., Попов Е. В.* Способы проветривания карьеров // Вестник Евразийской науки. – 2020. – Т. 12. – № 6. – С. 1–7. URL: <https://esj.today/PDF/79NZVN620.pdf> (дата обращения: 14.09.2021).
6. *Авторское свидетельство СССР №819357, 08.05.79. Клубничкин Е. К., Рогач М. С., Павлов А. Ю., Проплетин А. М., Демидов Ю. В.* Устройство для вентиляции глубоких карьеров. 1981. Бюл. № 13.
7. *Авторское свидетельство СССР №1767193, 13.08.1990. Калюжный В. В., Гудим С. Ф.* Устройство для проветривания глубоких карьеров. 1992. Бюл. № 37.
8. *Авторское свидетельство СССР №120108, 07.06.2012. Плагин А. И., Опара Ю. С., Бурангулов Н. И., Яньшин Д. В.* Технический комплекс для создания восходящих атмосферных потоков. 2012. Бюл. № 27.
9. Патент РФ №2215157, 31.05.2002. Морин А. С., Буткин В. Д., Нехорошева Л. В., Новосёлов Р. Г., Бартель А. Я. Способ искусственной вентиляции карьеров. 2003. Бюл. № 30.
10. *Ушаков К. З., Михайлов В. А.* Аэрология карьеров: Учебник для вузов. – М.: Недра, 1985. – 272 с.
11. *Конорев М. М., Нестеренко Г. Ф.* Оценка состояния и перспективы применения систем вентиляции и пылегазоподавления на карьерах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. – №2. – С. 113–120.
12. *Сытенков В. Н.* Обеспечение безопасной работы персонала в загрязненной атмосфере глубоких карьеров // Рациональное освоение недр. – 2013. – №2. С. 50–55.
13. *Raj V., Vandopadhyay S.* Mitigation of Pollutants in Deep Open-Pit Mines under Arctic Air Inversion // 16th North American Mine Ventilation Symposium, Golden, CO. June 2017. URL: <https://www.researchgate.net/publication/349443750> (дата обращения: 14.09.2021)/
14. *Драгунский О. Н.* О разрушении внутрикарьерных инверсий средствами искусственной вентиляции // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № 5. – С. 13–21.
15. *Морин А. С., Борисов Ф. И., Косолапов А. И.* Обоснование динамических схем трубопроводного проветривания глубоких карьеров // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2011. – № 8. – С. 10–18.
16. *Цвигун В. Н.* Торнадо – гигантская тепловая машина, разрушающая инфраструктуру пульсирующими скачками давления ветра по механизмам малоциклового усталости // Журнал передовых исследований в области естествознания. – 2018. – № 5. – С. 24–29.
17. Интенсивные атмосферные вихри и их динамика / Под ред. И. И. Мохова, М. В. Курганского, О. Г. Чхетиани. – М.: ГЕОС, 2018. – 482 с.

18. Мазуров М. Е. Торнадо — его физические механизмы и свойства // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2019. — Т. 83. — № 1. — С. 113—120. DOI 10.1134/S0367676519010150.

19. Баутин С. П., Крутова И. Ю., Обухов А. Г. Газодинамическая теория закрученных потоков. — Екатеринбург: УРГУПС, 2020. — 399 с.

20. Вараксин А. Ю. Воздушные и огненные концентрированные вихри: физическое моделирование (обзор) // Теплофизика высоких температур. — 2016. — Т. 54. — Вып. 3. — С. 430—452. DOI: 10.7868/S0040364416030224.

21. Tohidi A., Gollner M. J., Xiao H. Fire Whirls // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2018, vol. 50, pp. 187—213. DOI: 10.1146/annurev-fluid-122316—045209.

22. McNulty J. UK Patent Application GB2461250A, 05.06.2008. Method for Creating Extremely Tall, Fluid Dynamic 'Cloud Fountains'. 30.12.2009. URL: <https://patents.google.com/patent/GB2461250A/en?q=GB+2461250> (дата обращения: 14.09.2021).

23. Harman J., Rafael S. US Patent Application US20140345696A1, 06.11.2012. Atmospheric circulation system and method. 27.11.2014. URL: <https://patents.google.com/patent/US20140345696A1/en?q=us20140345696> (дата обращения: 14.09.2021).

24. Патент РФ №2734532, 10.07.2020. Ковлеков И. И. Способ проветривания карьеров. 2020. Бюл. № 29.

25. Патент РФ №2741294, 31.07.2020. Ковлеков И. И. Способ проветривания воронкообразного карьера. 2021. Бюл. № 3.

26. Патент РФ №2651666, 21.06.2017. Шахрай С. Г., Шарова Н. А. Способ интенсификации естественного воздухообмена в глубоких карьерах. 2018. Бюл. № 12. **ИЗВ**

## REFERENCES

1. Luo H., Zhou W., Jiskani I. M., Wang Z. Analyzing Characteristics of Particulate Matter Pollution in Open-Pit Coal Mines: Implications for Green Mining. *MDPI, Energies*. 2021, vol. 14, no. 9, 19 p. DOI: 10.3390/en14092680.

2. Evaluating the Air Flow and Gas Dispersion Behavior in a Deep Open-Pit Mine Based on Monitoring and CFD Analysis: A Case Study at the Coc Sau Open-Pit Coal Mine (Vietnam). Nguyen Van Duc, Changwoo Lee, Xuan-Nam Bui and other. *Proceedings of the International Conference on Innovations for Sustainable and Responsible Mining*. 2020, pp. 224—244. DOI:10.1007/978—3—030—60839—2\_12.

3. Choudhury A., Bandopadhyay S. The Effect Of Velocity On The Dispersion Of Pollutants In A Hypothetical Arctic Open-pit Mine. *Proceedings of the 24th International Conference on Modelling, Monitoring and Management of Air Pollution (AIR 2016)*, 20—22 June 2016, Crete, Greece. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. WIT Press, 2016, vol. 207, pp. 35—45.

4. Tukkaraja P., Keerthipati M., French A. Simulating temperature inversions in surface mines using computational fluid dynamics. *Proceedings of the South Dakota Academy of Science*. 2016, vol. 95, pp 119—124.

5. Timofeeva Yu.V., Suksova S.A., Dolkan A.A. and Popov E.V. Methods of airing quarries. *The Eurasian Scientific Journal*, 2020, vol.12, no. 6, pp. 1—7, available at: <https://esj.today/PDF/79NZVN620.pdf> (accessed 14.09.2021). [In Russ].

6. Klubnichkin E. K., Rogach M. S., Pavlov A. Ju., Propletin A. M., Demidov Ju. V. *Patent SU 819357 A1. Arrangement for airing deep quarries. 08.05.79*. [In Russ].

7. Kaljuzhnyj V. V., Gudim S. F. *Patent SU 1767193 A1. Equipment for ventilation of deep quarries. 13.08.90*. [In Russ].

8. Plugin A. I., Opara Ju.S., Burangulov N. I., Jan'shin D. V. *Patent RU 120108 U1. Technical complex for creating rising atmospheric streams. 07.06.2012*. [In Russ].

9. Morin A. S., Butkin V. D., Nehorosheva L. V., Novosjolov R. G., Bartel' A.Ja. *Patent RU 2215157 C1. Method of artificial ventilation of opencasts. 31.05.2002*. [In Russ].

10. Ushakov K. Z., Mikhailov V. A. *Aerology of Open Pit Mines*: University Textbook. Moscow: Nedra, 1985. 272 p. [In Russ].

11. Konorev M. M., Nesterenko G. F. Present-day and promising ventilation and dust-and-gas suppression systems at open pit mines. *Journal of Mining Science*, 2012, vol. 48, no. 2, pp. 322 – 328. [In Russ].
12. Sytenkov V. S. Ensuring the safe operation of the staff in the polluted atmosphere of deep pits. *Ratsionalnoe osvoenie nedr.* 2013, no. 2, pp. 50 – 55. [In Russ].
13. Raj V., Bandoopathyay S. Mitigation of Pollutants in Deep Open-Pit Mines under Arctic Air Inversion. *16th North American Mine Ventilation Symposium, Golden, CO. June 2017*, available at: <https://www.researchgate.net/publication/349443750> (accessed 14.09.2021).
14. Dragunskiy O. N. Breaking inversions in open pit mines using induced ventilation facilities. *Mining informational and analytical bulletin.* 2019, no. 5, pp. 13 – 21. [In Russ].
15. Morin A. S., Borisov F. I., Kosolapov A. I. Justification of dynamic schemes of the pipeline-airing of deep open pits. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal.* 2011, no. 8, pp. 10 – 18. [In Russ].
16. Tsvigun V. N., Koinov R. S. Tornado giant heat engine, destroying infrastructure pulsating irregular pressure of the wind on mechanisms for low cycle fatigue. *Journal of advanced research in natural science.* 2018, no. 5, pp. 24 – 29. [In Russ].
17. *Intense atmospheric vortices and their dynamics.* Ed. by: I. I. Mokhov, M. V. Kurgansky, O. G. Chkhetiani. Moscow: GEOS, 2018, 482 p. [In Russ].
18. Mazurov M. E. Physical mechanisms and properties of tornadoes. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2019, vol. 83, no. 1, pp. 97 – 103. DOI 10.1134/S0367676519010150. [In Russ].
19. Bautin S. P., Krutova I. Yu., Obukhov A. G. *Gas-dynamic theory of upward swirled flows.* Yekaterinburg: Ur GUPS, 2020, 399 p. [In Russ].
20. Varaksin A. Y. Concentrated air and fire vortices: physical modeling (a review). *High Temperature.* 2016, vol. 54, no. 3, pp. 409 – 427. DOI: 10.7868/S0040364416030224. [In Russ].
21. Tohidi A., Gollner M. J., Xiao H. Fire Whirls. *Annual Review of Fluid Mechanics.* 2018, no. 50, pp. 187 – 213. DOI: 10.1146/annurev-fluid-122316 – 045209.
22. McNulty J. UK Patent Application GB2461250A, 05.06.2008. Method for Creating Extremely Tall, Fluid Dynamic ‘Cloud Fountains’. available at: <https://patents.google.com/patent/GB2461250A/en?q=GB+2461250> (accessed 14.09.2021).
23. Harman J., Rafael S. *US Patent Application US20140345696A1, 06.11.2012.* Atmospheric circulation system and method. available at: <https://patents.google.com/patent/US20140345696A1/en?q=us20140345696> (accessed 14.09.2021).
24. Kovlekov I. I. *Patent RU 2734532 C1. Pit ventilation method. 10.07.2020.* [In Russ].
25. Kovlekov I. I. *Patent RU 2741294 C1. Method for funnel-shaped pit ventilation. 31.07.2020.* [In Russ].
26. Shakhraj S. G., Sharova N. A. *Patent RU 2651666 C1. Method of intensification of natural air exchange in deep pits. 21.06.2017.* [In Russ].

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Ковлеков Иван Иванович* – докт. техн. наук, профессор, <http://orcid.org/0000-0002-5121-8240>, Горный институт, Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова, 677000, г Якутск, ул.Белинского, д. 58, Россия, e-mail: [kovlekov@mail.ru](mailto:kovlekov@mail.ru).  
**Для контактов:** *Ковлеков И. И.*, e-mail: [kovlekov@mail.ru](mailto:kovlekov@mail.ru).

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Kovlekov I. I.*, Dr. Sci. (Eng.), professor, <http://orcid.org/0000-0002-5121-8240>, Mining Institute, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, 677000, 58 Belinsky str., Russia, e-mail: [kovlekov@mail.ru](mailto:kovlekov@mail.ru).

Получена редакцией 29.09.2021; получена после рецензии 01.03.2022; принята к печати 10.04.2022.  
 Received by the editors 29.09.2021; received after the review 01.03.2022; accepted for printing 10.04.2022.