

УДК 624.4

### РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НОВОЙ ВЕНТИЛЯТОРНОЙ СИСТЕМЫ ПРОВЕТРИВАНИЯ КАРЬЕРОВ

*С. П. ЕРОНЬКО<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф., ersp@meta.ua; М. Ю. ТКАЧЕВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук; Е. Н. СМИРНОВ<sup>2</sup>, д-р техн. наук, проф.; В. А. СКЛЯР<sup>2</sup>, канд. техн. наук; А. В. САЗОНОВ<sup>2</sup>, канд. техн. наук*  
 (<sup>1</sup> ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»,  
<sup>2</sup> Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал)  
 ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»»)

По данным исследователей, до 80 % полезных ископаемых в настоящее время добывается открытым способом в карьерах, глубина которых достигает 500–700 м и более [1, 2]. При этом около 50 % годового времени работу в таких карьерах проводят в условиях нарушения воздухообмена с окружающей средой и накопления вредных примесей в образующихся застойных зонах, что в конечном счете является причиной простоя оборудования из-за невозможности нахождения обслуживающего персонала в местах с предельно допустимой концентрацией опасных веществ [3, 4].

Для поддержания требуемого ритма функционирования карьеров и надлежащих условий работы технического персонала необходимы специальные аэрационные установки, реализующие различные способы вентиляции глубоких рукотворных впадин [5–8]. Несмотря на наличие в технической литературе значительного объема информации о существующих вентиляторных системах, основанных на использовании в них самолетных винтомоторных и реактивных силовых установок, смонтированных на базе колесных или гусеничных тягачей, лишь несколько из них нашли практическое применение. Данное обстоятельство объясняется тем, что большинство известных агрегатов характеризуется высоким потреблением топлива или электроэнергии, значительными эксплуатационными затратами, а также низкими показателями работы. Поэтому задача создания новой вентиляторной установки, лишенной отмеченных недостатков, имеет важное научно-практическое значение. Для ее успешного решения необходим учет достоинств и недостатков наилучших существующих образцов оборудования данного класса.

В итоге анализа результатов литературного обзора и патентного поиска в качестве аналогов для вновь создаваемой вентиляторной установки были отобраны две модификации систем

вентиляции карьеров, выпущенных в России на базе шасси автомобиля БелАЗ. В первой из них направленный газоздушный поток создают с помощью пропеллера, размещенного на специальном кронштейне впереди кабины тягача и вращаемого его двигателем через систему зубчатых передач и карданный вал [9]. Недостатком данной установки является то, что с ее помощью можно формировать газоздушный поток только вдоль оси, параллельной поверхности, на которой в карьере расположено транспортное средство. Это в значительной мере ограничивает объем проветриваемой зоны карьера и для ее увеличения требует последовательного изменения положения транспортного средства путем его маневрирования в стесненных условиях.

С целью расширения зоны проветриваемого пространства карьера у второй установки силовой агрегат в виде турбовинтового авиационного двигателя размещен на поворотной платформе, смонтированной за кабиной на раме автомобиля [10]. Наличие у данной установки поворотной горизонтальной платформы позволяет без маневрирования ходовой частью осуществлять изменение направления сформированного газоздушного потока по кругу в горизонтальной плоскости выше уровня платформы. Однако при ее использовании возникает так называемая мертвая зона пространства карьера, прилегающая к его донной поверхности. Кроме того, обеспечиваемая с ее помощью вентиляция предполагает перемещение газоздушных масс только внутри карьера, и поэтому не позволяет удалять их за его пределы.

Устранение отмеченных недостатков, присущих рассмотренным аналогам, потребовало принятия новых технических решений, позволяющих расширить функциональные возможности вентиляторных систем, обеспечивающих циркуляцию в пространстве газоздушных потоков. В связи с этим авторами предложено ис-

пользовать для этих целей новый тип вентилятора, конструкция которого защищена патентом Российской Федерации [11]. На рис. 1 схематично представлена установка для проветривания карьеров, работу которой обеспечивает так называемый безлопастной вентилятор.

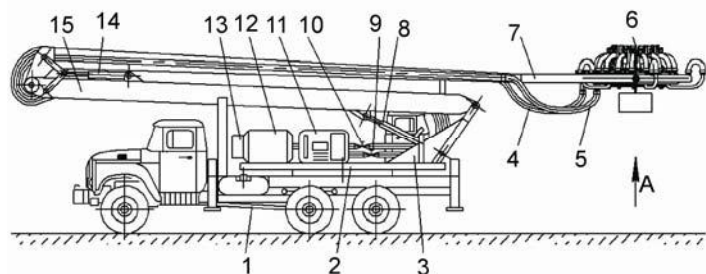


Рис. 1. Общий вид разработанной вентиляторной установки

Установка содержит ходовую часть 1 на базе трехосного грузового автомобиля, на раме которого смонтирована поворотная горизонтальная платформа 2 с жестко закрепленными на ней основанием 3 плоского трехзвенного рычажного механизма и воздушным компрессором 11 для подачи по гибким трубопроводам 4 и 5 сжатого воздуха к системе возбуждения и формирования газоздушного потока, выполненной в виде горизонтально расположенного безлопастного вентилятора 6. Данный вентилятор шарнирно связан с конечным звеном 7 рычажного механизма, несущая балка 15 которого с возможностью поворота в вертикальной плоскости одним концом соединена с основанием 3. Относительное перемещение в пространстве балки 15 и звена 7 обеспечивается силовыми гидроцилиндрами 8 и 14. Компрессор 11 и маслонасос 13, обеспечивающий работу гидроцилиндров, приводятся в действие двигателем внутреннего сгорания 12. Вентили 9 и 10 служат для регулирования расхода воздуха, поступающего к элементам безлопастного вентилятора 6.

Безлопастной вентилятор (рис. 2) включает горловину, образованную полыми сегментами 12 с щелевыми соплом и наружной поверхностью Коанда, закрепленными посредством дисков 10 к круглым фланцам 9 несущего кольца 13 с возможностью относительного фиксированного поворота в радиальной плоскости и сообщающимися посредством гибких рукавов 11 с полостью 1-й торообразной газораспределительной камеры 7, которая размещена концентрически относительно несущего кольца 13 и снабжена под-

водящим патрубком, соединенным с одним из гибких трубопроводов.

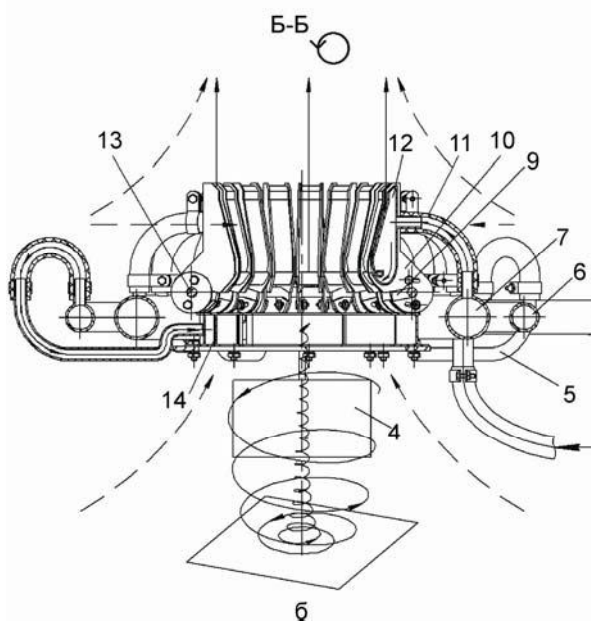
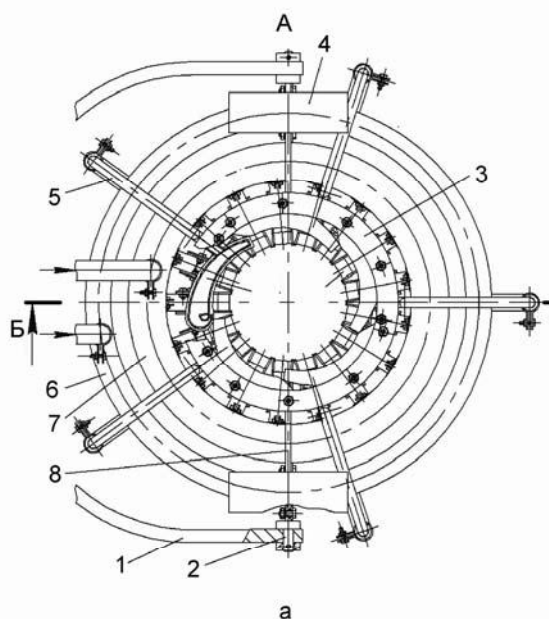


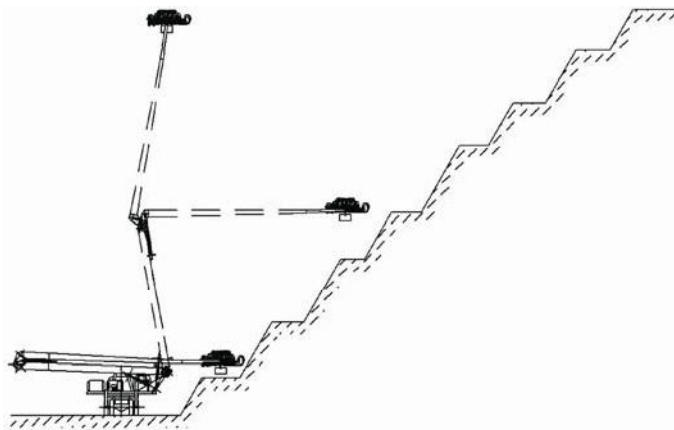
Рис. 2. Вид безлопастного вентилятора снизу (а) и его продольный разрез (б)

На входе горловины, образованной полыми сегментами 12, размещен завихритель потока, включающий полые сегменты 14 (см. рис. 2, б) с щелевыми соплами и внутренней поверхностью Коанда, закрепленные последовательно по окружности на несущей скобе 3 в плоскости, перпендикулярной продольной оси горловины. При этом полости сегментов 14 посредством трубопроводов 5 сообщаются с полостью 2-й торообразной газораспределительной камеры 6,

имеющей подводный патрубок, соединенный с другим гибким трубопроводом. Корпуса торообразных газораспределительных камер 6 и 7 жестко закреплены на кронштейнах 8, которые с помощью цапф 2 шарнирно связаны с конечным звеном 1 плоского рычажного механизма. К кронштейнам 8 жестко прикреплены балансировочные грузы 4, удерживающие безлопастный вентилятор в горизонтальном положении относительно конечного звена 1 плоского рычажного механизма.

Установка работает следующим образом. Для осуществления вентиляции карьера ее доставляют в загазованную зону. При необходимости предварительно выверяют базу автомобиля в горизонтальной плоскости, после чего запускают размещенные на поворотной платформе компрессор и связанную с его приводом маслостанцию. Вращая платформу в нужном направлении, а также перемещая в вертикальной плоскости с помощью гидроцилиндров звенья плоского рычажного механизма, основание которого жестко закреплено на платформе, безлопастный вентилятор помещают в досягаемую зону загазованного пространства (рис. 3). Благодаря балансировочным грузам, жестко прикрепленным к кронштейнам, безлопастный вентилятор поворачивается на цапфах относительно конечного звена плоского рычажного механизма и постоянно находится в горизонтальном положении. В момент достижения в ресивере компрессора требуемого давления воздуха вентили открывают. Сжатый воздух по гибким трубопроводам через подводные патрубки поступает в полости торообразных газораспределительных камер. Далее сжатый воздух из 1-й торообразной газораспределительной камеры по гибким рукавам попадает внутрь полых сегментов, образующих горловину безлопастного вентилятора. Одновременно с этим сжатый воздух из 2-й торообразной газораспределительной камеры по трубопроводам направляется в полые сегменты. Воздух, истекающий с большой скоростью из щелевых сопел полых сегментов, возбуждает первичные газовые потоки, направленные по поверхностям Коанда, которые создают зону пониженного давления, благодаря чему воздушные массы, находящиеся под горловиной, всасываются в нее и выбрасываются вверх по направлению потока. В свою очередь, воздух, истекающий из щелевых сопел, закрепленных последовательно по окружности на несущей скобе полых сегментов, огибает их внутренние поверхности Коанда и закручивает движущийся через горло-

вину поток, возбуждая эффект торнадо, способствующий усилению притока к безлопастному вентилятору газоздушных масс из окружающего пространства. При этом, регулируя вентилями соотношение расходов сжатого воздуха, подаваемого от компрессора к полым сегментам горловины и к полым сегментам завихрителя безлопастного вентилятора, добиваются максимально возможной его производительности.



**Рис. 3.** Относительное положение элементов конструкции установки в рабочем положении (гибкие трубопроводы условно не показаны)

С целью проверки правильности и предварительной оценки эффективности новых технических решений, заложенных в конструкцию предлагаемой вентиляторной установки, спроектировали и изготовили в масштабе 1:5 ее действующую модель (рис. 4).



**Рис. 4.** Физическая модель новой вентиляторной системы проветривания карьеров

В ходе модельных исследований в качестве оценочных критериев приняли расходные и скоростные характеристики газовых потоков, возбуждаемых с помощью безлопастного вентилятора. Лабораторные эксперименты проводили в три этапа. Вначале по методике, подробно освещенной в работе [12], получили информацию о достигаемых значениях коэффициента умножающего эффекта, под которым в специальной литературе считают отношение объемного расхода газовой смеси на выходе из горловины вентилятора к объему воздуха, подаваемого в единицу времени в его полые сегменты. Для этого использовали плоскую прозрачную модель, включавшую два полых сегмента вентилятора с конструктивными параметрами (рис. 5):  $\alpha = 15$  град.,  $\beta = 25$  град.,  $\gamma = 45$  град.,  $\delta = 0,7$  мм,  $B = 50$  мм,  $d = 85-205$  мм. В полости сегментов под избыточным давлением в пределах 50–150 кПа компрессором с заданным расходом, контролируемым с помощью ротаметра, подавали воздух, и с применением специального зонда измеряли скорость формировавшегося на выходе из горловины модели вентиляторной системы газовой воздушного потока. Его визуализацию на темном фоне обеспечивали светлым дымом, поступающим из генератора, расположенного ниже модели. Измерительный зонд включал тензорезисторный преобразователь — упругую пластину с наклеенными фольговыми датчиками, консольно закрепленную одним своим концом в цилиндрическом стеклянном баллончике, а вторым концом связанную с рычагом, несущим приемный элемент в виде диска диам. 10 мм. Зонд позволял преобразовать значение динамического давления, действующего на его приемный диск со стороны газовой воздушного потока, в аналоговый сигнал, пропорциональный плотности и скорости во второй степени движущейся среды. Для обеспечения контроля в режиме реального времени записи регистрируемого сигнала и последующего анализа его формы и значения в измерительную систему входили также усилитель переменного тока, аналого-цифровой преобразователь и ЭВМ с печатающим устройством. По результатам измерений, погрешность которых, по данным статистической обработки, не превышала 5 %, были построены поля скоростей ( $v$ , м/с), зафиксированных в поперечных сечениях газовой воздушных потоков на различном удалении ( $H$ , мм) от горловины плоской модели исследуемого вентилятора (рис. 6) и дающих возможность рассчитать осредненные значения обеспечиваемых ею объемных расходов. Отношение этих значений и соответствующих им показаний ротаметра о расходе рабочей газовой смеси, подававшейся в полые сегменты модели вентилятора, позволили определить достигаемый ею коэффициент умножающего эффекта

(табл. 1). Значение данного коэффициента в значительной мере зависит от давления воздуха, поступающего в полости сегментов с поверхностью Коанда.

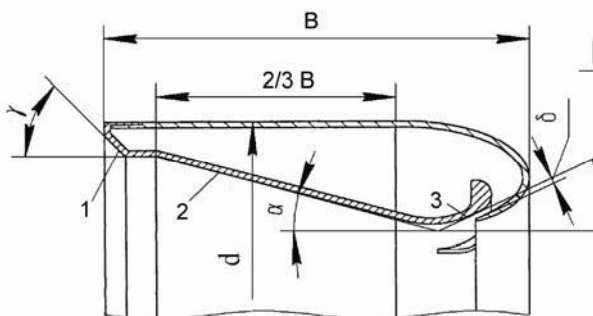
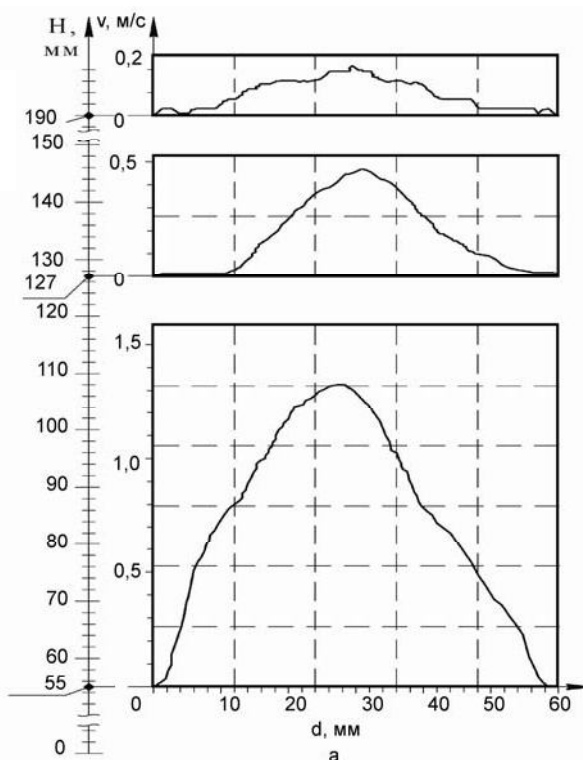


Рис. 5. Основные геометрические параметры профиля сегмента модели вентилятора:  
1 — скошенная поверхность; 2 — диффузор;  
3 — поверхность Коанда



б

Рис. 6. Поля скоростей газовой воздушного потока на различном удалении от выхода горловины плоской модели вентиляторной системы (а) и его визуализированная картина в зоне формирования (б) при давлении 50 кПа и объемном расходе энергоносителя 8 л/мин



**ТАБЛИЦА 1. СКОРОСТНЫЕ И РАСХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАБОТЫ ПЛОСКОЙ МОДЕЛИ БЕЗЛОПАСТНОГО ВЕНТИЛЯТОРА**

Значение параметров работы модели вентилятора		Осредненная скорость потока эвакуируемой газовой смеси, м/с	Объемная производительность модели вентилятора, л/мин	Значение коэффициента умножающего эффекта вентилятора
давление воздуха, кПа	расход воздуха, л/мин			
50	8	0,8	28,8	3,6
	10	1,1	39,6	3,9
	12	1,3	46,8	3,9
100	8	1,4	50,4	6,3
	10	1,8	64,8	6,5
	12	2,2	79,2	6,6
150	8	2,3	82,8	10,4
	10	2,9	104,4	10,4
	12	3,5	126,0	10,5

На втором этапе экспериментальных исследований проводили стендовое испытание опытного образца безлопастного вентилятора, изготовленного с учетом рациональных значений его конструктивных параметров, проверенных на плоской физической модели. Во время тестирования работы новой вентиляторной системы с использованием скоростной видеосъемки осуществили фиксацию картин развития газодинамических процессов, протекающих в зоне размещения безлопастного вентилятора, находящегося на различном удалении от источника дыма. Для этого вентилятор предварительно закрепляли на трех вертикальных стойках над раздвоенным щелевым соплом, формирующим расходящиеся под заданным углом два направленных потока дыма. Дым поступал от специального генератора, включавшего заполненную тлеющими древесными опилками металлическую гильзу и дымосос радиального типа. Угол отклонения от вертикали потоков дыма, истекавших из щелевых сопел, был подобран с учетом геометрических параметров вентилятора с таким расчетом, чтобы дымовые струи не имели прямого попадания в его горловину. Благодаря этому моделировались неблагоприятные начальные условия работы вентиляторной системы (рис. 7, а, фото слева). После запуска вентилятора отрабатывали различные режимы его функционирования, предусматривающие эвакуацию дыма при отключенном завихрителе потоков (см. рис. 7, а, среднее фото) и его задействовании (см. рис. 7, а, правое фото).

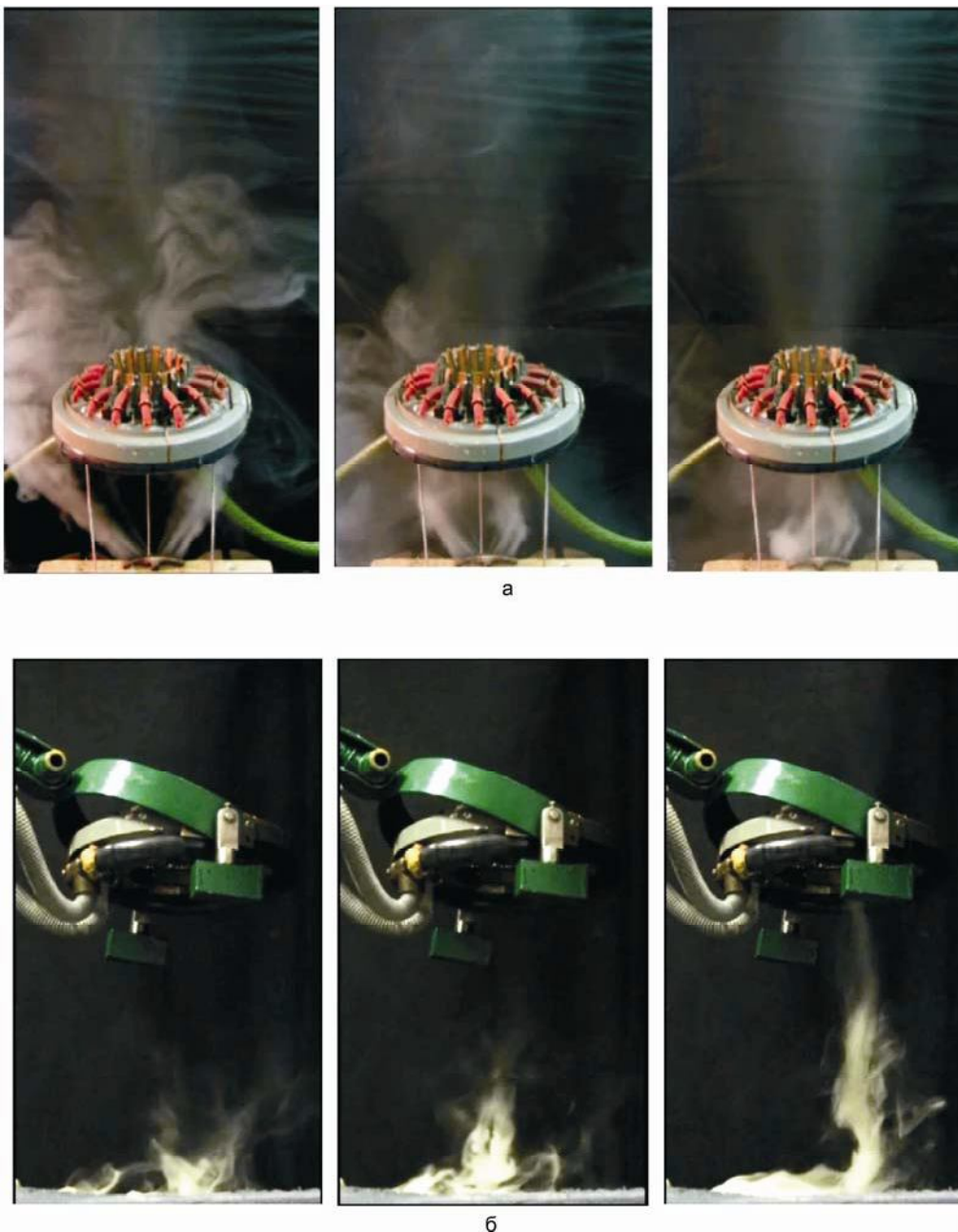
Анализ просмотренных в динамике и в режиме «стоп-кадр» видеозаписей, полученных для всего диапазона изменения удаленности вентилятора от источника дыма (раздвоенного щелевого сопла), свидетельствует о том, что максимальная эффективность функционирования системы безлопастного вентилятора обеспечивается в случае одновременной работы ее узлов возбуждения и завихрения газовой смеси потоков при определенном соотношении объемов воздуха, подаваемых в единицу времени в по-

лости элементов, образующих указанные узлы. В частности, для тестируемого безлопастного вентилятора соотношение объемных расходов воздуха, подаваемого к узлам возбуждения и завихрения газовых (дымовых) потоков, составляло 3:2. При данном соотношении зафиксированы максимальные значения параметров, характеризующих эффективность работы вентилятора. Например, коэффициент умножающего эффекта составил 10,5, а максимальная высота, на которую выталкивается дым, достигала 3 м.

На третьем этапе модельных исследований новой вентиляторной системы провели серию экспериментов с целью подтверждения возможности эвакуации с ее помощью холодного дыма, стекающего тонким ровным слоем по горизонтальной поверхности, имитирующей донную часть карьера. В этом случае к щелевому соплу, размещенному на стальной плите, дым от генератора поступал по удлиненному трубопроводу, в результате чего его температура снижалась, и он расстилался по плите ровным слоем, толщина которого не превышала 10 мм. После формирования слоя холодного дыма в зону его расположения с помощью рычажного механизма (см. рис. 4) подавался безлопастной вентилятор, занимавший горизонтальное положение на некоторой высоте над поверхностью металлической плиты. Затем к рабочим узлам вентилятора от компрессора, размещенного на поворотной платформе рядом с основанием рычажного механизма, по гибким трубопроводам с соответствующими расходами под избыточным давлением поступал воздух. При его истечении из щелевых сопел полых сегментов, входящих в состав узлов возбуждения и завихрения потоков эвакуируемой газовой смеси, непосредственно под вентилятором наблюдалось зарождение и последующее развитие вихря (см. рис. 7, б), засасывающего по восходящей спирали дым в его горловину, выбрасываемый из нее с большой скоростью на высоту нескольких метров. Следует отметить то обстоятельство, что устойчивое существование зарождавшихся вихрей обеспечива-

лось при определенном удалении вентилятора от поверхности плиты, имитирующей дно карьера (табл. 2). В случае дальнейшего увеличения высоты расположения вентилятора наблюдались периодические срывы спиралеобразных потоков дыма. Это свидетельствовало о том, что при данных значениях давления и расхода воздуха, поступавшего в полые сегменты рабочих узлов вентилятора, развиваемая им мощность была недостаточной для возникновения эффекта торнадо. Поэтому высокая эффективность функционирования безлопастного вентилятора

может быть обеспечена при правильно подобранных значениях давления и расхода энергоносителя, поскольку их произведение определяет мощность, обеспечиваемую вентиляторной системой. В связи с этим одно из главных направлений дальнейших исследований вентилятора данного типа должно быть связано с получением теоретических и эмпирических зависимостей, позволяющих выполнить оценочные расчеты его основных параметров, при которых можно добиться максимально возможного КПД проектируемой вентиляторной системы.



**Рис. 7.** Характерные картины потоков дыма, наблюдавшиеся при различных режимах функционирования безлопастного вентилятора во время эвакуации горячего (а) и холодного (б) дыма

**ТАБЛИЦА 2. ПАРАМЕТРЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БЕЗОПАСНОГО ВЕНТИЛЯТОРА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ СУЩЕСТВОВАНИЕ ВОСХОДЯЩИХ ПО СПИРАЛИ ПОТОКОВ ХОЛОДНОГО ДЫМА**

Давление воздуха, кПа	Расход подаваемого воздуха, л/мин		Удаление вентилятора от поверхности слоя дыма, при котором наблюдался срыв спиралеобразного восходящего потока, м
	узел возбуждения потоков	узел завихрения потоков	
100	30	20	0,8
	50	30	1,2
	60	40	1,5

Таким образом, предложенная вентиляторная система проветривания карьеров обладает рядом преимуществ по сравнению с известными аналогами и может быть рекомендована к практическому применению. Для создания ее опытно-промышленного образца необходимы

дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования, направленные на обоснование рациональных конструктивных и энергосиловых параметров, обеспечивающих эффективный газоотсос из рабочей зоны карьера.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Старостин, И. И. Проветривание карьеров струйными вентиляторами в комплексе с устройством для аэрации [Текст] / И. И. Старостин, А. В. Бондаренко // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. — 2015. — № 1. — С. 32–41.
2. Конорев, М. М. Обоснование выбора схем проветривания и режимов работы систем вентиляции карьеров [Текст] / М. М. Конорев, Г. Ф. Нестеренко // Горный информационно-аналитический бюллетень: научно-технический журнал. — 2002. — № 4. — С. 73–76.
3. Косарев, Н. П. Аэродинамика струйно-всасывающей схемы вентиляции застойных зон глубоких карьеров [Текст] / Н. П. Косарев, С. А. Тимухин, Ю. В. Попов [и др.] // Изв. вузов: Горный журнал. — 2005. — № 4. — С. 16–18.
4. Сытенков, В. Н. Управление пылегазовым режимом глубоких карьеров [Текст]: монография / В. Н. Сытенков. — М.: Геоинформцентр, 2003. — 288 с.
5. Конорев, М. М. Оценка состояния и перспективы применения систем вентиляции и пылегазоподавления на карьерах [Текст] / М. М. Конорев, Г. Ф. Нестеренко // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2012. — № 2. — С. 113–120.
6. Конорев, М. М. Состояние исследований и перспективы применения систем вентиляции и пылегазоподавления в атмосфере карьеров [Текст] / М. М. Конорев, Г. Ф. Нестеренко // Горный информационно-аналитический бюллетень: научно-технический журнал. — 2008. — № 3. — С. 9–20.
7. Конорев, М. М. К вопросу вентиляции и пылегазоподавления в атмосфере карьеров [Текст] / М. М. Конорев // Там же. — 2006. — № 3. — С. 107–126.
8. Голинько, В. И. Вентиляция шахт и рудников [Текст]: учебное пособие для вузов / В. И. Голинько, Я. Я. Лебедев, О. А. Муха. — Днепропетровск: НГУ, 2014. — 266 с.
9. А. с. 590458 СССР, МПК Е 21 F 1/08. Установка для проветривания карьеров [Текст] / С. С. Филатов, А. И. Павлов, С. М. Росляков [и др.]. — № 2189042/22-03; заявл. 10.10.1975; опубл. 30.01.1978. Бюл. № 4.
10. А. с. 581301 СССР, МПК Е 21 F 1/00. Карьерная оросительно-вентиляционная установка [Текст] / В. С. Азаров, Г. М. Варич, В. Н. Верба [и др.]. — № 2198537/22-03; заявл. 11.12.1975; опубл. 25.11.1977. Бюл. № 43.
11. Пат. 2630443 Российской Федерации, МПК F 24 F 7/00, F 04 D 25/00, F 04 D 29/00. Узел безопасного вентилятора для эвакуации газопылевых выбросов из промышленных агрегатов [Текст] / Е. Н. Смирнов, С. П. Еронько, М. Ю. Ткачев [и др.]. — № 2016119782; заявл. 23.05.2016; опубл. 07.09.2017. Бюл. № 25.
12. Еронько, С. П. Исследование на физической модели возможности использования принципа вентилятора Дайсона в системах газоотсоса металлургических агрегатов [Текст] / С. П. Еронько, М. Ю. Ткачев, А. С. Сосонкин // Металлургические процессы и оборудование. — 2014. — № 2. — С. 51–59.