

УДК 622.45

**АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В СВЕРХДЛИННОЙ УГОЛЬНОЙ ЛАВЕ  
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СТРУЙНОГО ВЕНТИЛЯТОРА  
НА ОЧИСТНОМ КОМБАЙНЕ****С. А. Павлов***Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,**E-mail: pavlov\_s\_a@inbox.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Приведены результаты исследования влияния работы струйного вентилятора, установленного на очистном комбайне, на изменение параметров аэродинамического сопротивления выемочного участка, концентрации метана и угольной пыли. Исследования проводились в программном комплексе Ansys Fluent, на основании натурных данных, полученных в угольных шахтах Кузбасса. Объектом исследования служила пылегазовоздушная атмосфера сверхдлинных угольных лав протяженностью 400 м с мощностью вынимаемого пласта 2.4 и 3.7 м. Выявлено, что применение струйного вентилятора способно снизить аэродинамическое сопротивление выемочного участка до 35 %, что позволяет увеличить на 24 % количество подаваемого в лаву воздуха без увеличения мощности на главных вентиляционных установках. Поток воздуха, исходящий из струйного вентилятора, способствует устранению застойных метановоздушных зон вблизи работающего комбайна и снижает концентрацию угольной пыли на рабочих местах машинистов на 13.8 – 36.7 %.

*Шахта, очистной забой, сверхдлинная лава, очистной комбайн, струйный вентилятор, аэродинамическое сопротивление, механизированная крепь, концентрация метана, угольная пыль*

DOI: 10.15372/FTPRI20240413

EDN: YYDAQC

Процесс проветривания очистных угольных забоев должен быть постоянным и непрерывным, чтобы обеспечить эффективное удаление отработанного воздуха и замену его свежим. Известно, что по мере перемещения горных работ на глубокие горизонты требуется увеличение подачи воздуха в шахту. Изменение аэродинамического сопротивления забоев за время цикла работы очистного комбайна обуславливает изменение расхода воздуха через него. Это изменение сказывается на пылегазовой обстановке очистного забоя и участка в целом.

С увеличением протяженности горных выработок возрастает их аэродинамическое сопротивление, поэтому главной вентиляционной установке требуется все больше мощности, чтобы обеспечить рабочие зоны необходимым количеством воздуха. По разным оценкам, доля общих затрат электроэнергии, приходящейся на системы вентиляции шахт, составляет 30 – 70 %, что существенно сказывается на конечной себестоимости добытого угля [1 – 4].

Исследование выполнено в рамках проекта НИР (№ гос. регистрации 121052500147-6).

В настоящее время на многих горнодобывающих предприятиях внедряется разработка пластов сверхдлинными лавами, чтобы соответствовать требованиям современных высокопроизводительных очистных комплексов [5–7]. Очистной механизированный комплекс, занимающий около 50 % проходного сечения лавы, является основным препятствием для воздушного потока. Увеличение протяженности забоя, оборудованного очистным комбайном и механизированной крепью, неизбежно приводит к увеличению аэродинамического сопротивления на данном участке и повышению требований к эффективности главных вентиляционных установок. Разработка способов повышения эффективности проветривания сверхдлинных угольных лав без увеличения нагрузки на вентиляторы главного проветривания — весьма актуальная задача.

В очистных выработках основная часть энергии движущегося потока затрачивается на преодоление лобового сопротивления (до 70–80 %) и меньшая часть — на преодоление сопротивления трения [8]. Установка струйного вентилятора на очистной комбайн позволяет снизить аэродинамическое сопротивление в районе ведения выемочных работ путем принудительного перемещения воздушного потока в обход препятствия на этом участке [9].

В данном исследовании ограничимся параметрами добычных участков, наиболее характерными для большинства шахт Кузбасса. Угленосная толща Кузнецкого угольного бассейна содержит около 350 угольных пластов различной мощности, неравномерно распределенных по простиранию. Преобладающая мощность пластов угля составляет 1.3–4.0 м. Следует отметить, что мощность разрабатываемого пласта оказывает существенное влияние на аэродинамическое сопротивление очистных выработок и сказывается на величине потока вентиляционной струи. Проведенный анализ показал, что наибольшее распространение имеют лавы с мощностью вынимаемого пласта 2.4 и 3.7 м.

Примем геометрические параметры таких очистных выемочных столбов в качестве исходных данных и при помощи вычислительных экспериментов проведем оценку эффективности их проветривания с применением струйных вентиляторов, установленных на очистном комбайне. Кроме размеров поперечного сечения лав (рис. 1), их протяженность принималась равной 400 м с сопряжением с двухсотметровыми участками вентиляционного и конвейерного штреков. На основании проектных данных исследуемых шахт средняя расчетная скорость воздуха в лавах составляет 2.0–2.5 м/с. Осевой струйный вентилятор имел диаметр 0.6 м (выпускаемый серийно по существующим аэродинамическим характеристикам) и мог развивать скорость воздушного потока на выходе 15–30 м/с. Основным условием выбора типоразмера струйного вентилятора является средняя скорость воздуха по сечению лавы, которая вблизи рабочих мест очистной выработки не должна превышать 4 м/с, допустимую по Правилам безопасности.

В течение технологического цикла геометрические параметры очистного забоя непостоянны, в отличие от других выработок. Рассмотрим изменение аэродинамического сопротивления при расположении очистного комбайна на шести позициях (рис. 1). Позиция 1 (0 м) — начальное положение очистного комбайна, осуществившего врезку в пласт. Позиция 2 (200 м от начала) — расположение очистного комбайна в средней части на 1/2 длины лавы. Позиция 3 (300 м от начала) — 3/4 длины лавы. Позиция 4 (350 м) — 7/8 длины лавы. Позиция 5 (375 м) — 15/16 длины лавы. Позиция 6 (400 м) соответствует крайнему положению очистного комбайна, завершившего проход по лаве, но не преграждающего сечение конвейерного штрека.

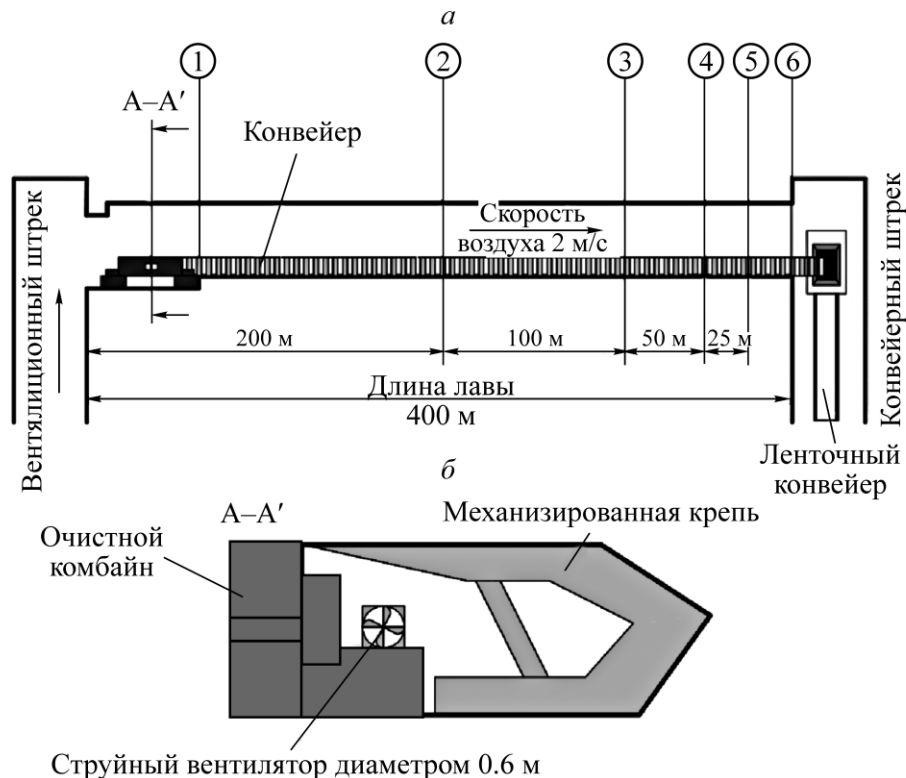


Рис. 1. Схема добычного участка (а), очистной механизированный комплекс (б) и расположение позиций (1 – 6) очистного механизированного комплекса по длине лавы

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения задач вычислительной гидродинамики применялся программный комплекс Ansys Fluent. Начальное воздухораспределение на расчетном участке решалось в стационарной постановке, без учета метана и пыли, с применением стандартной модели турбулентности  $k-\varepsilon$ . Граничные условия задавались шероховатостью поверхностей выработок, давлением на входных сечениях конвейерного и вентиляционного штрека, на основании расчета, выполненного при сетевом моделировании шахты методом графов с сосредоточенными параметрами. В дальнейшем задача воздухораспределения при перемещении очистного конвейера решалась в нестационарной постановке.

Аэродинамическое сопротивление лавы, определяемое при нормальных условиях воздушной среды (при температуре 18 °С и атмосферном давлении 101325 Па), имеет размерность  $1 \text{ км} = 9.81 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8$ . Для “пустой” очистной выработки с мощностью вынимаемого пласта 2.4 м, без учета механизированного комплекса, аэродинамическое сопротивление составляет  $0.039145 \text{ км}$ . При установке механизированной крепи и комбайна в лаве аэродинамическое сопротивление возрастет до  $0.087210 \text{ км}$ , что в 2.2 раза больше “пустой” выработки. Для лавы с мощностью вынимаемого пласта 3.7 м эти значения составят  $0.012038$  и  $0.036197 \text{ км}$  соответственно; аэродинамическое сопротивление выработки, оснащенной механизированным комплексом, в 2.9 раза больше “пустой”.

Вывемка угля в лаве сопровождается непрерывным перемещением очистного комбайна. В период его работы в призабойном пространстве лавы можно выделить три характерные зоны: до прохода комбайна, после прохода комбайна и район его работы. В зависимости от направления отработки пласта комбайном (в попутном с направлением движения воздушно-

го потока или в обратном) геометрические параметры очистной выработки также меняются. В среднем при мощности отрабатываемого пласта 1.3–4.0 м аэродинамическое сопротивление участка лавы до и после прохода комбайна примерно на 40 и 200 % ниже, чем сопротивление участка лавы в районе работы комбайна. Такие изменения аэродинамического сопротивления призабойного пространства влияют на перераспределение количества воздуха в его пределах и по всему выемочному участку.

При помощи Ansys Fluent, методом конечных объемов проведен расчет, показавший изменение аэродинамического сопротивления исследуемого участка в зависимости от места расположения механизированного комплекса в лаве (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Аэродинамическое сопротивление исследуемого участка шахтной сети при включении струйного вентилятора с разной производительностью, установленного на очистном комбайне в лаве с мощностью вынимаемого пласта 2.4 и 3.7 м

Скорость воздушной струи вентилятора, м/с	Расположение комбайна, номер позиции					
	1	2	3	4	5	6
	Аэродинамическое сопротивление, кПа					
0 (выключен) 15 22 30	2.4 м					
	0.088086	0.089046	0.088966	0.088775	0.088735	0.084530
	0.077355	0.078256	0.078113	0.079021	0.080628	0.081837
	0.068466	0.069216	0.068253	0.068644	0.071167	0.081625
	0.056910	0.058101	0.057024	0.057335	0.059128	0.088364
0 (выключен) 15 22 30	3.7 м					
	0.037024	0.038017	0.035921	0.035697	0.035199	0.035323
	0.035601	0.036891	0.034300	0.037798	0.039164	0.048216
	0.031838	0.033226	0.030459	0.032776	0.034130	0.055374
	0.028075	0.029705	0.026705	0.027993	0.031220	0.058872

С началом добычных работ появляется участок с повышенным аэродинамическим сопротивлением (зона работы комбайна примерно 20 м, позиция 1), так как на воздушный поток оказывает возмущающее действие корпус комбайна и передвигаемые вслед за ним секции крепи. В результате аэродинамическое сопротивление лавы повышается и достигается своего максимального значения при приближении комбайна к середине очистной выработки, т. е. когда весь участок с повышенным сопротивлением будет влиять на общее сопротивление лавы. При дальнейшем продвижении комбайна аэродинамическое сопротивление лавы начинает снижаться, поскольку увеличивается участок с меньшим сопротивлением (после прохода комбайна) и уменьшается участок с большим сопротивлением (до прохода комбайна).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка эффективности струйного вентилятора, установленного на очистном комбайне, на изменение расхода воздуха в лаве. На основании полученных результатов можно провести оценку влияния работы струйного вентилятора, установленного на очистном комбайне, на изменение аэродинамического сопротивления исследуемого участка. В дополнение к классическому определению аэродинамического сопротивления выработки (зависящего от ее геометрических параметров, шероховатости поверхностей и др.) будет учитываться влияние струйного вентилятора, установленного на очистном комбайне. В качестве допущения следует принять условие, что проходящий через струйный вентилятор вентиляционный поток имеет постоянную скорость 15, 22 и 30 м/с (табл. 1).

Струйный осевой вентилятор принудительно осуществляет перемещение воздушных масс, создавая эффект эжекции на участке с наибольшим аэродинамическим сопротивлением в лаве, тем самым снижая его. Исключением является вариант расположения комбайна в позиции 6 (рис. 1), когда струя воздуха создает “воздушную пробку” в месте сопряжения лавы и конвейерного штрека. По достижении 25 м от края забоя, ближнего к конвейерному штреку, работу струйного вентилятора необходимо приостанавливать.

Таким образом, регулируя скорость воздушного потока, инициированного струйным вентилятором, установленным на очистном комбайне, можно уменьшать аэродинамическое сопротивление сверхдлинной лавы (протяженностью 400 м) с мощностью вынимаемого пласта 2.4 м на 11–35 %. Такое регулирование позволит увеличить количество поступающего в лаву воздуха на 6–24 % (рис. 2а) [8]. Для лавы с мощностью вынимаемого пласта 3.7 м снижение аэродинамического сопротивления составит 0–21 %. Количество поступающего в лаву воздуха при этом может быть увеличено до 12.5 % (рис. 2б).

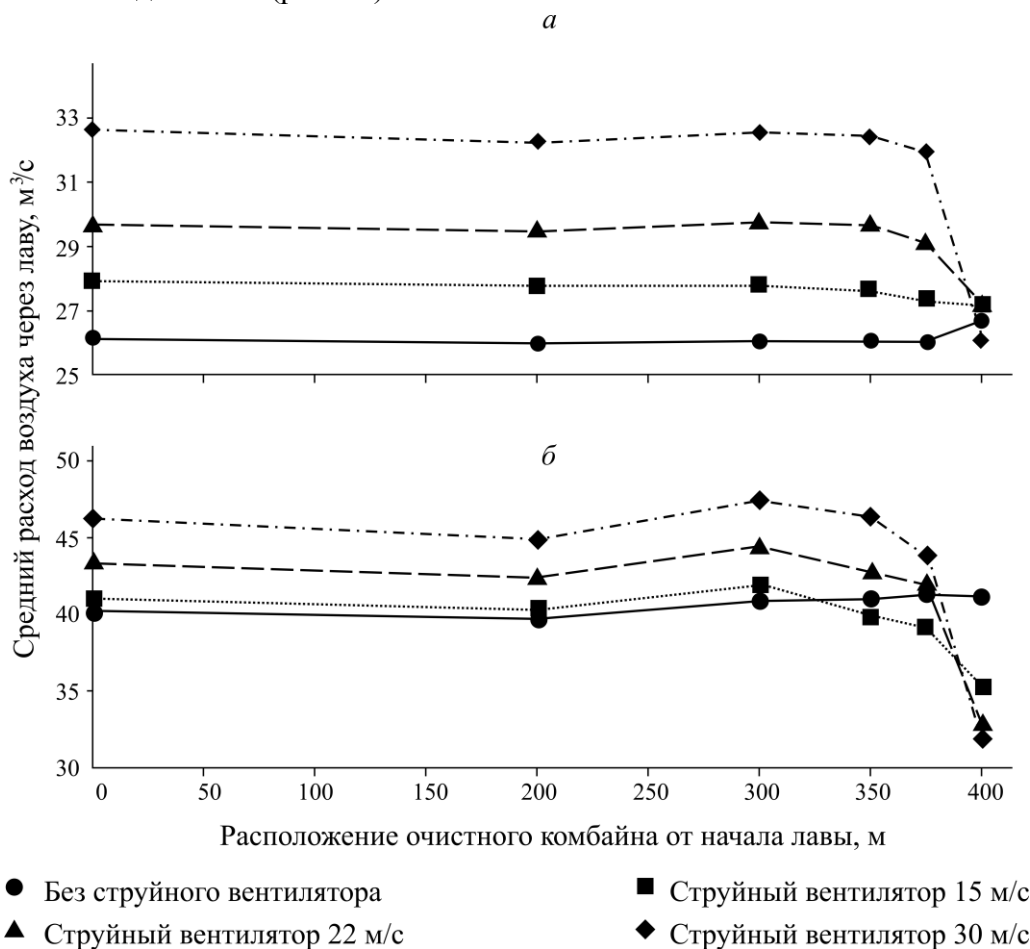


Рис. 2. Расход воздуха в лаве с мощностью пласта 2.4 (а) и 3.7 м (б) в зависимости от расположения очистного комбайна при разной скорости воздуха от струйного вентилятора

Оценка эффективности струйного вентилятора, установленного на очистном комбайне, на изменение концентрации метана в лаве. Способность метана формировать взрывоопасные скопления при определенных параметрах воздушной струи является основанием к увеличению подачи чистого воздуха на глубокие участки шахты [10–17]. Наиболее известный и распространенный метод борьбы с таким формированием скоплений метана — увеличение скорости воздушного потока в очистных выработках.

В очистном забое метановыделение в основном происходит с обнаженной части пласта при разрушении угля очистным комбайном и при транспортировке отбитого угля конвейером вдоль лавы и выработанного пространства. При этом "... концентрация метана в лаве при отсутствии выделения его из выработанного пространства изменяется вдоль лавы по закону, близкому к линейному, возрастая в направлении движения воздуха" [18].

В [19] приведено сравнение натуральных замеров концентрации метана на выемочном участке в угольной шахте и результатов численного моделирования. Метановыделение, зависящее от нагрузки на забой, должно быть надежно локализовано мощным потоком свежего воздуха. Однако ограниченная пропускная способность очистных выработок препятствует достижению высоких показателей добычи угля в газообильных шахтах. Чтобы устранить это препятствие, необходимо рационально распределить воздушные массы в призабойном пространстве.

Серия вычислительных экспериментов показала, что чем меньше мощность отрабатываемого пласта и сечение лавы, тем выше концентрация метана в воздухе при одинаковых скоростях его движения вдоль очистной выработки [19]. При этом зависимость концентрации метана от длины выработки имеет общий вид:

$$C(L) = aL + b,$$

где коэффициенты  $a$  и  $b$  изменяются нелинейно и зависят от средней скорости  $V$  движения потока воздуха в лаве. На основании проведенных исследований [20] установлено, что для очистной выработки с мощностью отрабатываемого пласта 2.4 м коэффициент  $a = 0.00134/V$ ,  $b = 0.11/V + 0.1$ . Для отрабатываемого пласта мощностью 3.7 м коэффициенты имеют следующие значения:  $a = 0.00087/V$ ,  $b = 0.06/V + 0.1$ .

Учитывая, что концентрация метана в лаве зависит в том числе и от расхода воздуха через нее, определим его изменение по длине лавы в зависимости от расположения комбайна для мощности пласта 2.4 и 3.7 м (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. Средняя концентрация метана на рассматриваемом участке шахтной сети при разной скорости струйного вентилятора, установленного на очистном комбайне, в лаве с мощностью отрабатываемого пласта 2.4 и 3.7 м

Скорость воздушной струи вентилятора, м/с	Расположение комбайна от начала лавы, м					
	0	200	300	350	375	400
	Концентрация метана (CH <sub>4</sub> ), %					
0 (выключен) 15 22 30	2.4 м					
	0.16	0.30	0.37	0.40	0.42	0.43
	0.15	0.29	0.35	0.39	0.41	0.42
	0.15	0.27	0.33	0.37	0.39	0.42
	0.15	0.26	0.31	0.34	0.36	0.44
0 (выключен) 15 22 30	3.7 м					
	0.12	0.18	0.21	0.22	0.23	0.23
	0.12	0.18	0.20	0.22	0.23	0.26
	0.12	0.17	0.20	0.22	0.23	0.27
	0.12	0.17	0.19	0.21	0.22	0.27

Результаты анализа показали, что работа струйного вентилятора на очистном комбайне способствует снижению концентрации метана в лаве в 1.08 – 1.17 раза. Учитывая, что вынос метана из очистной выработки существенно зависит от величины потока воздуха, возникновение “воздушной пробки” при подходе комбайна к конвейерному штреку с включенным струйным вентилятором снижает его эффективность. Поэтому на расстоянии 25 м от края забоя, ближнего к конвейерному штреку, струйный вентилятор необходимо выключить.

*Оценка эффективности струйного вентилятора, установленного на очистном комбайне, на изменение концентрации угольной пыли в лаве.* Концентрация пыли на рабочих местах машинистов комбайна и крепи в лаве в среднем за смену составляет 30 – 240 мг/м<sup>3</sup>, а при неудовлетворительном функционировании средств гидрообеспыливания превышает технически достижимый уровень (ТДУ) [21, 22].

В шахтах угольная пыль является одним из наиболее вредных и опасных факторов, который приводит к возникновению профзаболеваний у горняков и образует с воздухом взрывчатые смеси в подземной атмосфере выработок. Наличие пыли в метановоздушной среде снижает границу взрываемости метана до 3 %. Участие угольной пыли при детонации метана увеличивает силу взрыва и его разрушительную способность, которая часто бывает на порядок выше, чем у метановоздушной смеси [23].

С целью уменьшения опасности возгорания и взрыва угольной пыли целесообразно применять меры по снижению запыленности и пылеотложения в горных выработках. Для этого в сочетании с комплексным обеспыливанием воздуха при всех процессах угледобычи используются водяные завесы и пылеулавливающие устройства [24 – 28]. В некоторых шахтах за рубежом для снижения концентрации пыли на рабочих местах машиниста комбайна и машиниста крепи на очистных комплексах дополнительно устанавливают аспирационные установки, способствующие более быстрой очистке воздуха от пыли и выносу ее из рабочей зоны [29 – 32]. Предложен способ снижения аэродинамического сопротивления выемочного участка и выноса мелкодисперсной угольной пыли из рабочих зон забоя с помощью установки струйного вентилятора на очистном комбайне [9].

Для моделирования двухфазного течения существуют лагранжевы и эйлеровы модели [33]. В основе лагранжева подхода лежит рассмотрение движения отдельных частиц дисперсной фазы, в основе эйлерова подхода — изменение параметров течения (скоростей, давлений, температур) в точках пространства. Также существуют гибридные модели, в которых чередуются лагранжев и эйлеров подход. В гибридных моделях вводится усреднение по пространству и переход от реального распределения частиц к объемной доле.

Лагранжева модель DPM (модель дискретной фазы) подразумевает построение траекторий частиц дисперсной фазы в сплошной фазе на основе решения обыкновенных дифференциальных уравнений движения. Модель учитывает двухсторонний обмен импульсом и энергией частиц со сплошной фазой. Она применима для небольших значений объемной концентрации частиц, когда взаимодействие их между собой учитывается опосредованно. Для более точного учета взаимодействия частиц при увеличении концентрации используется гибридная модель DDPM (модель плотной дискретной фазы). Модель подразумевает, что частицы не накапливаются в какой-либо части расчетной области. Она применима для любых течений с относительно небольшой концентрацией частиц, если нужно учесть разброс/изменение размеров частиц, образование вторичных частиц, взаимодействие со стенкой.

Решение поставленной задачи проводилось при помощи гибридного подхода, представленного в расчетном комплексе Ansys Fluent моделью DDPM, построенной как комбинация моделей Eulerian (полная эйлерова модель, т.е. модель взаимопроникающих сред) и DPM [34]. В качестве двух сред, моделируемых в исследовании, принимались воздух и антрацитная пыль. Дисперсность пыли задавалась распределением Розина – Раммлера в диапазоне от 5 до 100 мкм согласно [35] (рис. 3).

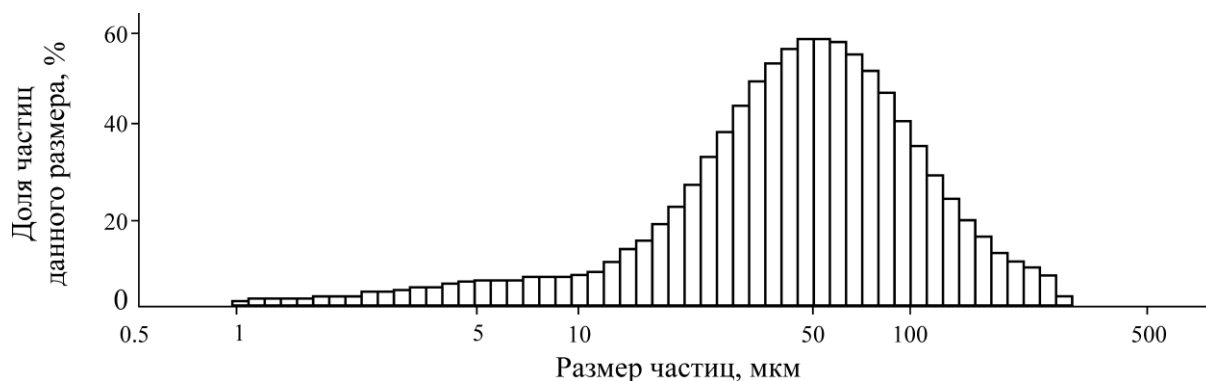


Рис. 3. Гистограмма фракционного распределения частиц пыли

При решении задачи исследования приняты следующие допущения: не учитывались системы орошения и пылеподавления от отбитого угля; принято, что со всех поверхностей потоком воздуха срывается равномерно 15 % пыли; учитывалось только инерционное прилипание частиц пыли к поверхностям исследуемого участка.

В отличие от метановоздушных параметров, концентрацию угольной пыли сложно оценивать на исходящей из забоя струе, да и по длине лавы она будет существенно изменяться в зависимости от режима работы и расположения очистного комбайна (как основного источника пыли и возмущения воздушного потока). Какая-то часть пыли осаждается, другая переходит во взвешенное состояние, что затрудняет получение общих закономерностей. По этой причине основные измерения концентрации угольной пыли будут фиксироваться в сечениях рабочих зон машиниста комбайна и машиниста крепи.

Наибольшее по длительности время своего нахождения в лаве очистной комбайн работает на “промежуточном” участке. Именно здесь элементы вентиляционной сети (такие, как поворот из вентиляционного штрека в лаву и, наоборот, из лавы в конвейерный штрек) оказывают наименьшее влияние на структуру струи приточного воздуха. Рассмотрим изменения концентрации пыли в рабочих зонах при расположении очистного комбайна в “промежуточной”, близкой к центру, части лавы.

При отработке угольного пласта очистным комбайном, движущимся против струи приточного воздуха (рис. 4), последняя разделяется на два потока: один (более выровненный и мощный) движется между механизированной крепью и огораживающей конструкцией конвейера, другой — между обнаженной поверхностью угольного пласта и конвейером. Поток 2, подхватывает выделяемую от режущих шнеков комбайна пыль и уносит ее дальше. Через 20–30 м массовая концентрация угольной пыли становится соизмерима с фоновым запылением от лавового конвейера.

Самые крупные частицы пыли (от 50 мкм и более), выделяемые от режущих шнеков комбайна, оседают на почве и конвейере, более мелкие — разносятся с потоком воздуха по остальному объему выработки. Значительная часть пыли оттесняется воздушным потоком к выработанному пространству, где оседает на конструкциях механизированной крепи (рис. 4).



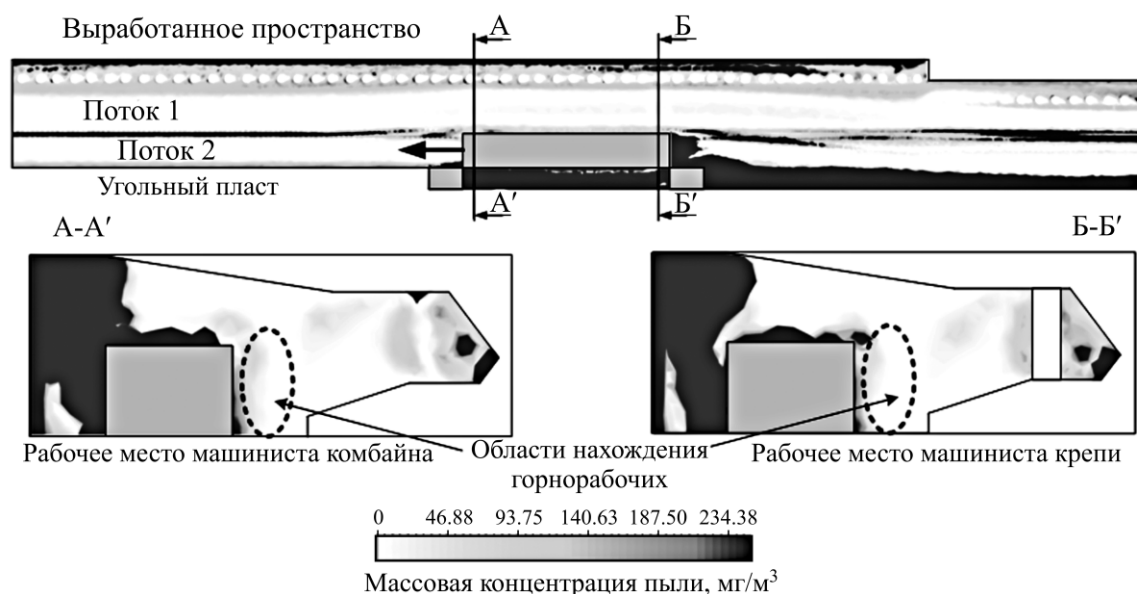


Рис. 4. Массовая концентрация угольной пыли на рабочих местах машинистов комбайна и крепи при движении очистного комбайна против направления потока воздуха

Средняя массовая концентрация угольной пыли в сечениях А-А' и Б-Б' составляет  $328 - 333 \text{ мг/м}^3$ . Непосредственно в области нахождения горнорабочих массовая концентрация находится в пределах  $90 - 140 \text{ мг/м}^3$ . Эти значения соответствуют ТДУ.

При движении очистного комбайна в попутном направлении с приточной струей воздуха (рис. 5) струя разделяется также на два потока: один движется между механизированной крепью и ограждающей конструкцией конвейера, другой — между обнаженной поверхностью угольного пласта и конвейером. Однако в этом случае более выровненным является поток 2, который подхватывает пыль от режущих шнеков комбайна и уносит ее дальше, вынося из рабочей зоны большее количество частиц пыли.

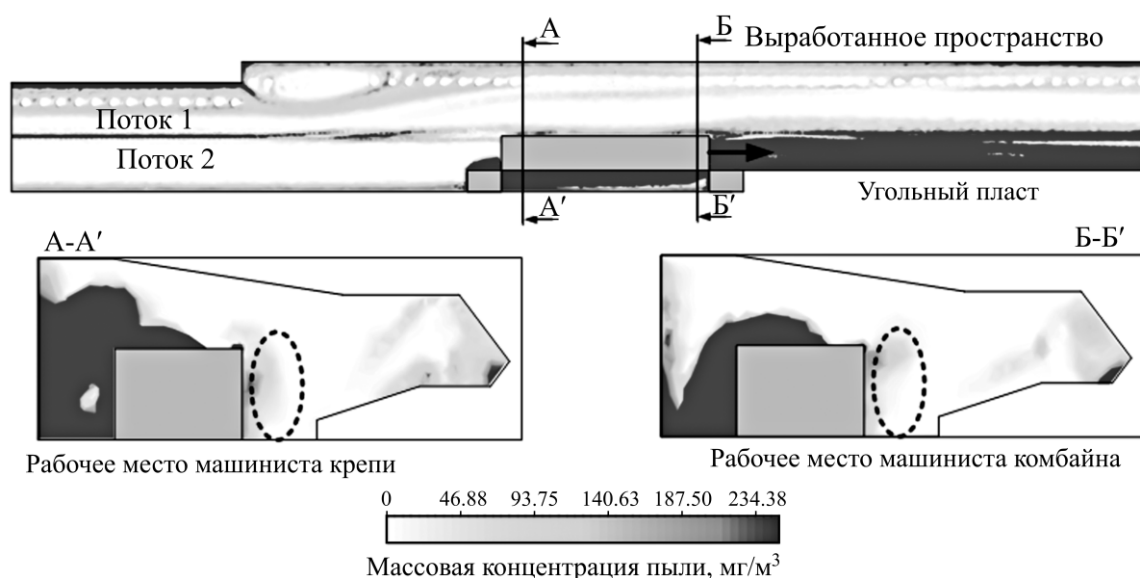


Рис. 5. Массовая концентрация угольной пыли на рабочих местах машинистов комбайна и крепи при движении очистного комбайна в попутном направлении с потоком воздуха

За счет изменения структуры поля скоростей воздушного потока 1 меньшая доля угольной пыли вытесняется к выработанному пространству, по сравнению с вариантом движения комбайна в противоположном направлении (рис. 4). Средняя массовая концентрация угольной пыли в сечениях А-А' и Б-Б' составляет 176–245 мг/м<sup>3</sup>. Непосредственно в области нахождения горнорабочих массовая концентрация находится в пределах 90–140 мг/м<sup>3</sup>. Эти значения соответствуют ТДУ.

Работа струйного вентилятора, установленного на очистном комбайне, способствует увеличению скорости потока воздуха и возникновению дополнительных вихрей (рис. 6). Часть этих вихрей выносит запыленность от границы с выработанным пространством. Основной же поток воздуха от струйного вентилятора снижает уровень запыленности за очистным комбайном, вынуждая тяжелые частицы пыли (от 50 мкм и более), выделяемые от режущих шнеков, оседать на почву и конвейер.

Таким образом, средняя массовая концентрация угольной пыли в исследуемых сечениях А-А' и Б-Б' снижается на 13,8–17,7 % до значений 270–287 мг/м<sup>3</sup>. В области нахождения машинистов комбайна и крепи массовая концентрация находится в пределах 90–140 мг/м<sup>3</sup>.

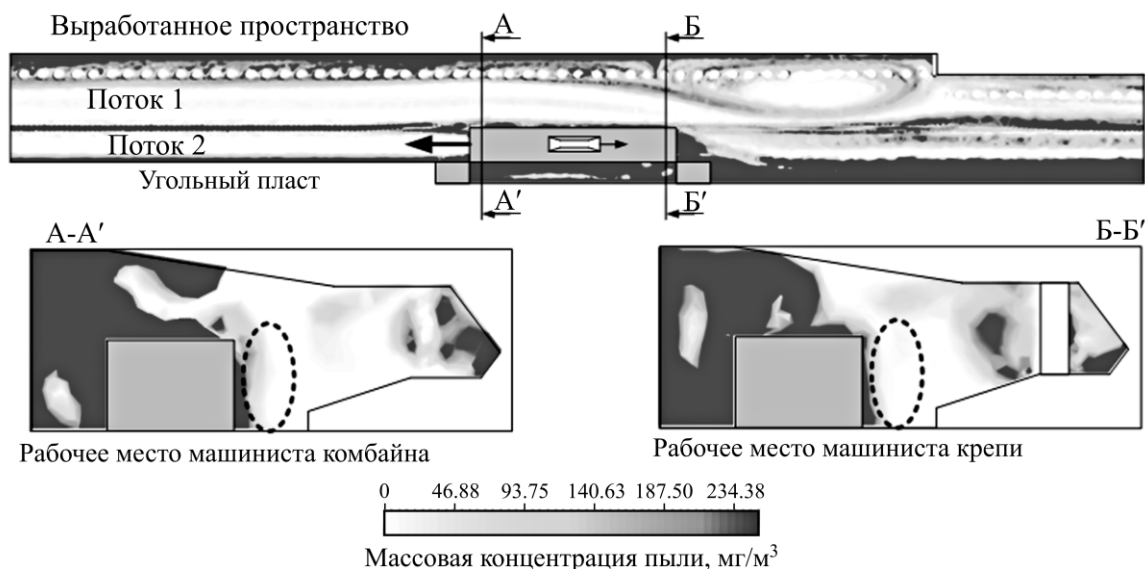


Рис. 6. Массовая концентрация угольной пыли на рабочих местах машинистов комбайна и крепи при движении очистного комбайна против направления потока воздуха, с учетом работы струйного вентилятора

Наилучшего результата по снижению массовой концентрации угольной пыли в очистной выработке удастся достичь при работе струйного вентилятора, когда комбайн движется в попутном направлении с приточной струей воздуха (рис. 7). В этом случае струйный вентилятор работает в режиме воздуходувки, сдувая до 80 % пыли, находящейся во взвешенном состоянии вблизи работающего комбайна. Побочные завихрения потоков воздуха выносят наибольшую часть угольной пыли от границы с выработанным пространством, а прямой поток от струйного вентилятора способствует осаждению частиц от режущих шнеков комбайна в основном на конвейер.

При этом средняя массовая концентрация угольной пыли в исследуемых сечениях А-А' и Б-Б' снижается на 34,1–36,7 % до значений 116–155 мг/м<sup>3</sup>. В области нахождения машинистов комбайна и крепи массовая концентрация находится в пределах 57–100 мг/м<sup>3</sup>. Эти значения соответствуют ТДУ.

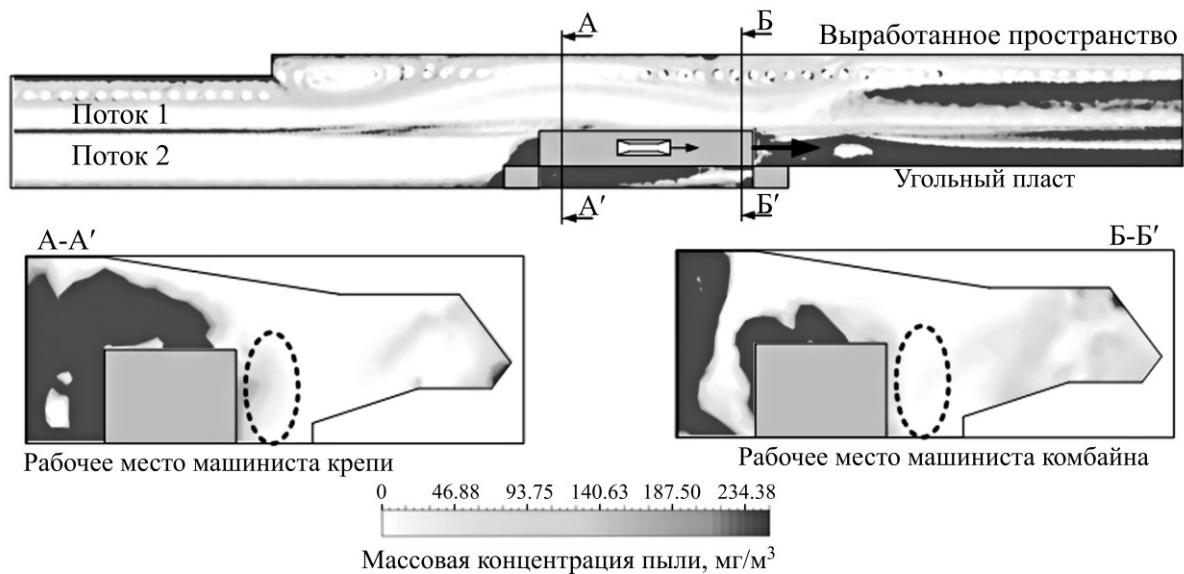


Рис. 7. Массовая концентрация угольной пыли на рабочих местах машинистов комбайна и крепи при движении очистного комбайна в попутном направлении с потоком воздуха, с учетом работы струйного вентилятора

## ВЫВОДЫ

Исследована технология вентиляции сверхдлинной угольной лавы с использованием струйного вентилятора, установленного на очистном комбайне. Показана эффективность такого способа проветривания в очистных выработках с мощностью пласта 2.4 м, что позволяет снизить: аэродинамическое сопротивление на 35 %, увеличивая расход воздуха на 24 %; концентрацию метана в 1.17 раза; среднюю массовую концентрацию угольной пыли в окрестностях работающего очистного комбайна на 13–36 %.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Старков Л. И., Земсков А. Н., Кондрашев П. И. Развитие механизированной разработки калийных руд. — Пермь: ПГТУ, 2007. — 519 с.
2. De Vilhena Costa L. Cost-saving electrical energy consumption in underground ventilation by the use of ventilation on demand, J. Margarida da Silva, Min. Technol., 2020, Vol. 129, No. 1. — P. 1–8.
3. Hardcastle S. G., Gangal M. K., and Leung E. Green and economic mine ventilation with an integrated air management system, Proc. 7<sup>th</sup> Int. Symp. on Mine Planning and Equipment Selection, 1998, Balkema, Rotterdam. — P. 785–793.
4. Wallace K., Prosser B., Stinnette J. D. The practice of mine ventilation engineering, Int. J. Min. Sci. and Technol., 2015, Vol. 25, Iss. 2. — P. 165–169.
5. Мешков А. А., Волков М. А., Ордин А. А., Тимошенко А. М., Ботвенко Д. В. О рекордной длине и производительности очистного забоя шахты им. В. Д. Ялевского // Уголь. — 2018. — № 7. — С. 4–7.
6. Ордин А. А., Тимошенко А. М., Ботвенко Д. В., Никольский А. М. Обоснование оптимальной длины и производительности очистного забоя при отработке мощного угольного пласта шахты “Талдинская-Западная-1” // Уголь. — 2019. — № 3. — С. 50–54.

7. Калинин С. И., Роут Г. Н., Игнатов Ю. М., Черданцев А. М. Обоснование суточной добычи угля из лавы длиной 400 м в условиях шахты им. В. Д. Ялевского // Вестн. КузГТУ. — 2018. — № 5 (129). — С. 27–35.
8. Абрамов Ф. А., Герцен Б. Е., Соболевский В. В., Шевелев Г. А. Аэрогазодинамика выемочного участка. — Киев: Наук. думка, 1972. — 234 с.
9. Павлов С. А. Интенсификация проветривания сверхдлинных угольных лав при использовании струйного вентилятора, установленного на очистном комбайне // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2021. — Т. 8. — № 2. — С. 216–222.
10. Пат. 2701900 С2 РФ. Способ вентиляции угольной лавы / А. М. Красюк, И. В. Лугин, С. А. Павлов, и др. // Оpubл. в БИ. — 2019. — № 28.
11. Филин А. Э. Метод пульсирующей вентиляции для дезинтеграции скоплений метана в горных выработках угольных шахт // ГИАБ. — 2006. — № S5. — С. 255–261.
12. Александров С. Н., Булгаков Ю. Ф., Яйло В. В. Охрана труда в угольной промышленности. — Донецк: РИА ДонНТУ, 2012. — 480 с.
13. Ушаков К. З., Каледина Н. О., Кирич Б. Ф. Безопасность ведения горных работ и горноспасательное дело. — М.: МГТУ, 2002. — 487 с.
14. Айруни А. Т., Клебанов Ф. С., Смирнов О. В. Взрывоопасность угольных шахт. — М.: Изд-во. “Горное дело” ООО “Киммерийский центр”, 2011. — 264 с.
15. Костеренко В. Н., Тимченко А. Н. Факторы, оказывающие влияние на возникновение взрывов газа метана и угольной пыли в шахтах // ГИАБ. — 2011. — № 7. — С. 368–377.
16. Уварова В. А. О причинах отравлений при крупных авариях на угольных шахтах // Технологии техносферной безопасности. — 2012. — № 6 (46). — С. 1–7.
17. Филин А. Э. Классификация горных выработок по степени опасности возникновения скоплений метана // Тематическое приложение “Метан” к ГИАБ. — 2005. — С. 223–229.
18. Филин А. Э. Механизм разрушения скоплений метана в горных выработках // Тематическое приложение “Метан” к ГИАБ. — 2005. — С. 229–238.
19. Ушаков К. З. Рудничная вентиляция. — М.: Недра, 1988. — 440 с.
20. Павлов С. А. Способ снижения концентрации метана в сверхдлинной угольной лаве с использованием струйного вентилятора, установленного на очистном комбайне // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2023. — Т. 2. — № 1. — С. 186–193.
21. Бюллетень “Состояние условий труда работников, осуществляющих деятельность по сельскому хозяйству, охоте, лесному хозяйству, добыче полезных ископаемых, в обрабатывающих производствах, по производству и распределению электроэнергии, газа и воды, в строительстве, на транспорте и в связи Российской Федерации в 2015 году”. Т. 1. — М.: Федеральная служба государственной статистики (Росстат), Главный межрегиональный центр (ГМЦ), опубликовано 25.04.2016. — 106 с.
22. ГН 2.2.5.3532-18 “Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны”, утвержденные постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 13 февраля 2018 года № 25. — 176 с.
23. ГОСТ Р ИСО 7708-2006 Качество воздуха. Определение гранулометрического состава частиц при санитарно-гигиеническом контроле. Дата введения 01.11.2006. — М.: Науч.-исслед. центр контроля и диагностики техн. систем, 2006. — 16 с.
24. Нецпляев М. И., Любимова А. И., Петрухин П. М. и др. Борьба со взрывами угольной пыли в шахтах. — М.: Недра, 1992. — 298 с.
25. Нецпляев В. И., Петрухин П. М., Кравец В. М. Гидрозащита от взрывов угольной пыли в шахтах. — Киев: Техника, 1980. — 131 с.

26. Петрухин П. М., Нецепляев М. И., Киреев А. М. Предупреждение взрывов угольной пыли в конвейерных выработках // Совр. способы борьбы с пылью. — Донецк: ЦБТИ МУП УССР – МакНИИ, 1967. — С. 60–62.
27. Chandan I. S. and Singhal R. K. Dust Suppression in Mines, Colliery Guardian, 1965, Vol. 210, No. 5413. — P. 91–95.
28. Качан В. Н., Саранчук В. И., Данилов А. Т. Предупреждение взрывов угольной пыли в глубоких шахтах. — Киев: Техника, 1990. — 120 с.
29. Стуканов В. И., Иванов В. Н., Логинов С. М. Очистка рудничного воздуха от пыли при конвейерной доставке руды // Вентиляция шахт и рудников. — Л., 1983. — Вып. 10. — С. 84–87.
30. Johan-Essex V., Keles C., Rezaee M., Scaggs-Witte M., and Sarver E. Respirable coal mine dust characteristics in samples collected in central and northern Appalachia, Int. J. Coal Geol., 2017, Vol. 182. — P. 85–93.
31. Korneva M. V. and Korshunov G. I. Assessment of the dust load on the respiratory organs of workers in coal mines, taking into account the dispersed composition of the dust aerosol, Scientific Reports on Resource Issues, 2017, Vol. 1. — P. 416–421.
32. Organiscak J.A. Page S. J., Cecala A. B., and Kissell F. N. Surface mine dust control, In: Kissell FN, ed. Handbook for dust control in mining. Pittsburgh, PA: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH) Publication, 2003, No. 147. — P. 73–81.
33. Pope C. A., Burnett R. T., Thun M. J., Calle E. E., Krewski D., Ito K., and Thurston G. D. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution, JAMA, 2002, No. 287 (9). — P. 1132–1141.
34. Батурин О. В., Батурин Н. В., Матвеев В. Н. Расчет течений жидкостей и газов с помощью универсального программного комплекса Fluent. — Самара: СГАУ, 2009. — 151 с.
35. Кобылкин А. С. Исследования пылераспределения в очистном забое у комбайна // ГИАБ. — 2020. — № 6-1. — С. 65–73.

*Поступила в редакцию 15/VI 2024*

*После доработки 25/VI 2024*

*Принята к публикации 27/VI 2024*