

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОРОШЕНИЯ НА СКОРОСТЬ ПЫЛЕОСАЖДЕНИЯ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

И.Ю. Курносов

НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: kurnosovilya@yandex.ru

Аннотация: Взвешенная угольная пыль, образующаяся в горных выработках, представляет серьезную опасность как для людей, работающих в горнодобывающей сфере, так и для оборудования, задействованного при добыче. Существует множество различных мероприятий по снижению запыленности воздуха, но не всегда такие способы (жидкостное орошение, фильтрация воздуха, пылеулавливание перемычками (масляными, водяными, жалюзийными или бумажными), пылеулавливание при помощи циклонов и пылеотстойных камер) могут быть эффективны, особенно для специфических задач (если требуется удалить пыль за короткий промежуток времени). Одним из способов решения подобных задач может стать применение пульсирующей вентиляции, используемой для очистки воздуха горных выработок от метана, в связке с жидкостным орошением. Приведены результаты лабораторных исследований процессов пылеосаждения с орошением. Поскольку жидкостное орошение применяют на горнодобывающих производствах, для последующего сравнения был проведен эксперимент по осаждению пыли с применением жидкостного орошения. Определено время осаждения частичек водного аэрозоля. Также для последующего определения эффективности пылеосаждения и контроля значений концентрации водного аэрозоля определены и описаны формулами зависимости среднего значения концентрации пылеводяного и водного аэрозоля от времени.

Ключевые слова: моделирование, угольная пыль, пульсирующая вентиляция, жидкостное орошение, массоперенос, эксперимент по осаждению, аэрозоль жидкости, пылеводяной аэрозоль.

Для цитирования: Курносов И. Ю. Оценка влияния параметров орошения на скорость пылеосаждения в горных выработках // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 3. – С. 150–162. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_150.

Effect of operational parameters of spraying on dust suppression rate in roadways

I.Y. Kurnosov

National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia,
e-mail: kurnosovilya@yandex.ru

Abstract: Air-borne coal dust is a serious threat to both coal mine personnel and equipment. There is a variety of air dust reduction activities (liquid spraying, air filtering, oil/water/grill/paper trapping of dust, centrifugal dust collection or use of dust-catching chambers), but they are

not always effective, especially in solving specific tasks (short-time dust removal). A possible solution to this end can be the pulse ventilation, which is used to remove methane from mine air, in combination with liquid spraying. This article describes the lab-scale tests of dust suppression by spraying. Coal mines use liquid spraying, and this approach is therefore tested on a laboratory scale. The deposition time of water aerosol is determined. For estimating efficiency of dust suppression and to control water aerosol concentrations, the time functions of average concentrations of dust/water and water aerosols are obtained and described by formulas.

Key words: modeling, coal dust, pulse ventilation, liquid spraying, mass transfer, suppression test, water aerosol, dust/water aerosol.

For citation: Kurnosov I. Y. Effect of operational parameters of spraying on dust suppression rate in roadways. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(3):150-162. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_150.

Введение

На сегодняшний день одним из основных способов снижения концентрации пыли в воздухе до предельно допустимого значения, способствующих снижению аэрологических рисков [1, 2], является применение комплекса мероприятий по обеспыливанию воздуха рабочей зоны (орошение, аспирационное пылеудаление, пылеподавление и т.п.). С целью уменьшения запыленности воздуха в горных выработках горнодобывающих предприятий разрабатываются мероприятия по снижению запыленности, при которых уменьшается содержание пыли в воздухе, а также создаются условия для ее естественного удаления [3]. Для снижения запыленности производственных помещений угольных предприятий используются различные мероприятия по обеспыливанию производственных процессов, мероприятия по улавливанию пыли в процессе транспортировки угля, установки для фильтрации воздуха и т.д. [4–6].

Одним из возможных способов для управления массопереносом аэрозолей может стать применение пульсирующей вентиляции [7]. Повышение эффективности методов, снижающих запыленность в воздухе горных выработок, является

актуальной научной задачей и в настоящее время привлекает внимание многих исследователей [8–10]. В связи с этим большое значение приобретают вопросы разработки новых способов снижения запыленности воздуха [11, 12].

Поскольку описанный выше метод широко используется при удалении метана из шахт горнодобывающих предприятий, возникла идея применения его для осаждения угольной пыли [13, 14]. Так как получить данные процесса массопереноса возможно только эмпирическим путем, была создана экспериментальная установка для моделирования процессов осаждения угольной пыли [15], на которой были проведены эксперименты по осаждению угольной пыли, жидкостного аэрозоля и пылеводяного аэрозоля. Их результаты приведены в статье.

Подготовка навесок и проведение эксперимента по осаждению пыли

Для проведения эксперимента по пылеосаждению использовался прибор для измерения массовой концентрации аэрозольных частиц «Аэрокон-П». Прибор обладает диапазоном измерения частиц от 0,2–10 мкм, поэтому требовалось подготовить (измельчение и просеива-

ние) полученные пробы пыли согласно возможностям прибора, а также убедиться в диаметре исследуемых частичек пыли в пробах, проведя гранулометрический анализ. Исходя из анализа [16] подготовленных проб угольной пыли, процентное соотношение частичек размером до 10 мкм составляет около 15% исследуемой навески измельченной пыли (1 г – 15% частичек ≤ 10 мкм). Поскольку получить частицы такого размера не удалось, потребовалось прибегнуть к увеличению массы навески используемой в эксперименте пыли до такого значения, при котором количество частичек ≤ 10 мкм будет $\approx 100\%$.

Предельно допустимое значение концентрации пыли в единице объема воздуха составляет $0,001 \text{ г/м}^3$ (ПДК пыли в воздухе рабочей зоны). Чтобы получить требуемое количество частиц, увеличиваем массу навески в 6,7 раза для достижения $\approx 100\%$ частиц в 1 м^3 . Получаем значение массы навески, равное $0,007 \text{ г}$.

После проведения эксперимента с данной навеской фактическое значение концентрации прибором не было зафиксировано ($0,00 \text{ мг/м}^3$). В связи с этим был проведен дополнительный экспери-

мент по фиксированию прибором «Аэрокон-П» стабильной концентрации. В лабораторную установку поочередно вносили навески разной массы. График зависимости фактической концентрации пыли от массы навески представлен ниже.

При внесении навесок разной массы (рис. 1) проводилось исследование изменения концентрации пыли. Подходящей для эксперимента массой (при внесении 5 г пыли концентрация снижалась до $1,5 \text{ мг/м}^3$ и поддерживалась в течение 30 мин) оказалась навеска массой 5 г.

С данной навеской был проведен эксперимент по осаждению пыли в лабораторной установке с использованием генератора воздушного потока. Скорость движения воздушного потока в лабораторной установке – $4,0 \text{ м/с}$. Время работы генератора зависело от времени осаждения навески пыли и отлеживалось снижением ее концентрации. Влажность воздуха при начале каждого измерения варьировалась в диапазоне от 25–30%, температура – от 20–25 °С. Измерения температуры и влажности проводились прибором «Testo-735».

Время осаждения отслеживалось секундомером и прибором «Аэрокон-П»,

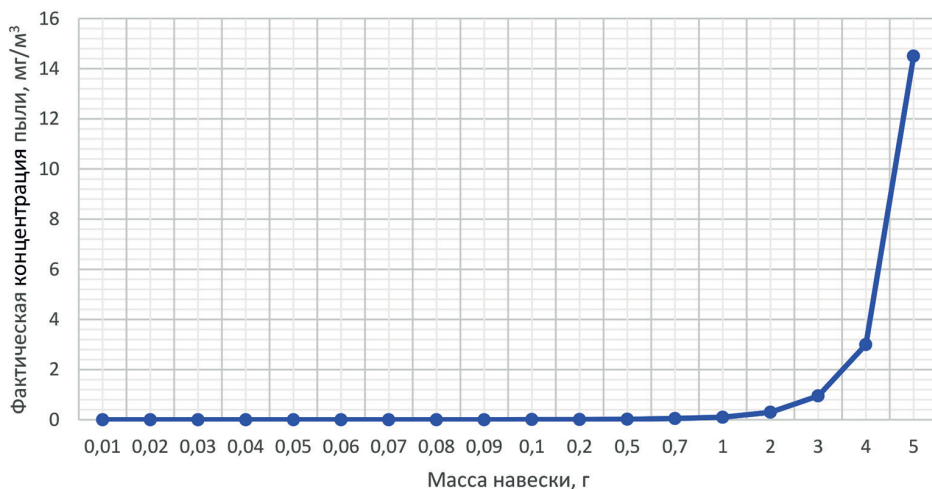


Рис. 1. График зависимости фактической концентрации пыли от массы навески

Fig. 1. Actual dust concentration versus sample weight

Результаты измерений концентраций пыли при моделировании запыленности в лабораторной установке
Dust concentration measurements in dustiness simulation on bench tester

Номер точки измерения	Масса навески, г	Максимальная концентрация, мг/м ³	Время (с) осаждения до 3,0 мг/м ³	Время (с) осаждения до 1,0 (ПДК) мг/м ³	Средняя концентрация за время осаждения мг/м ³
1	5,08	14,88	151	300	3,45
2	5,04	14,56	108	156	3,8
3	5,02	13,6	203	873	2,09
4	5,02	15,63	295	1638	1,46
5	5,02	12,47	169	679	2,09
6	5,03	15,44	187	1660	2,28
7	5,02	17,23	313	597	5,02
8	5,04	14,78	174	215	3,43
9	5,03	13,41	138	463	3,72
10	5,03	14,52	114	1695	1,95
Среднее значение	5	15	185	828	3

начиная с максимальной концентрации навески пыли, зафиксированной прибором. Время осаждения фиксировалось тогда, когда значение концентрации пыли на приборе снижалось до 3 мг/м³ (ЗПДК) и 1 мг/м³ (ПДК), таблица.

Описанный выше эксперимент по пылеосаждению требовался для определения времени снижения концентрации пыли. Измерения проводились поочередно, перемещая прибор по площади лабораторного бокса согласно рис. 2.

Для последующего анализа таблицы были построены гистограммы и графики. Из рис. 3 видно, что значения максимальных концентраций разнятся от эксперимента к эксперименту. Максимальное и минимальное значения максимальных концентраций пыли отличаются на 4,76 мг/м³ (27,6%). Такой характер может быть связан с неоднородностью размеров частиц пыли в навеске.

При проведении экспериментов было замечено, что при осаждении пыли до концентрации, равной 3 мг/м³ и 1 мг/м³, время осаждения разнится. Значение кон-

центрации, равной 3 мг/м³, достигается достаточно быстро (в среднем за 200 с), для достижения предельно допустимой концентрации времени требуется больше. Поскольку навеска пыли имеет в своем составе неоднородные частицы (разной массы и объема), было проведено 10 экспериментов для определения среднего

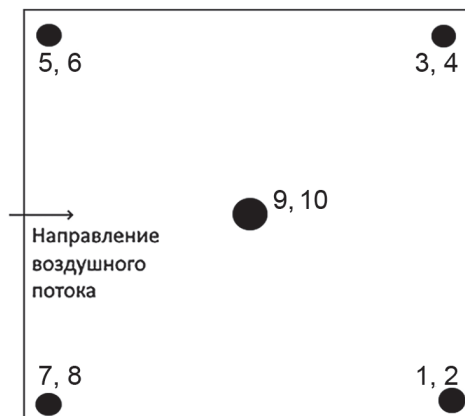


Рис. 2. Схема расположения датчика «Аэрокон-П» в лабораторном стенде при проведении экспериментов (вид сверху)

Fig. 2. Arrangement of mass concentration meter Aero-kon-P on bench tester during experiments (top view)

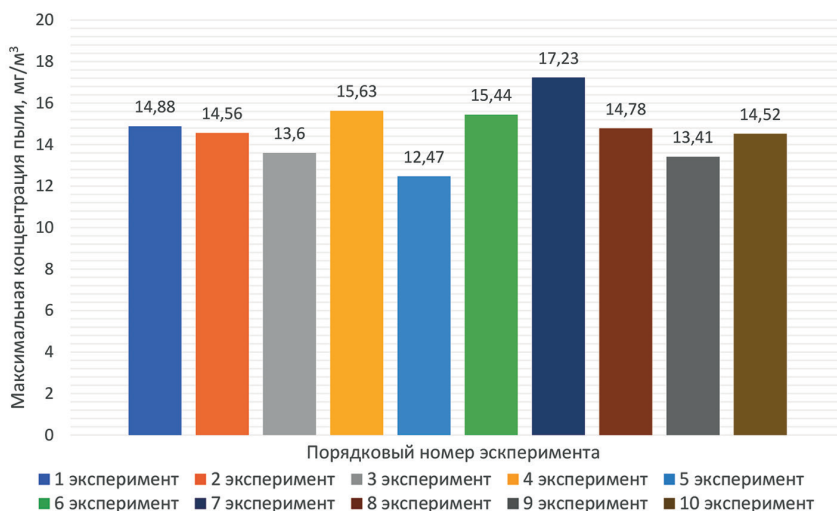


Рис. 3. Гистограмма максимальных значений концентраций пыли при проведении экспериментов по осадждению

Fig. 3. Bar chart of maximum dust concentrations in dust suppression tests eposition

времени осаднения. Результаты сведены в таблицу и изображены в виде гистограммы (рис. 4).

Из рис. 4 видно, что время осаднения до предельно допустимого значения (1 мг/м^3) имеет временной диапазон от 600 до 1100 с. Полученное экспериментальное значение времени осаднения пыли используется в дальнейшем для

определения эффективности осаднения пыли посредством орошения для моделируемых на лабораторном стенде условий.

Проведение эксперимента по осаднению водного аэрозоля

Поскольку в используемом для эксперимента лабораторном стенде нет воз-

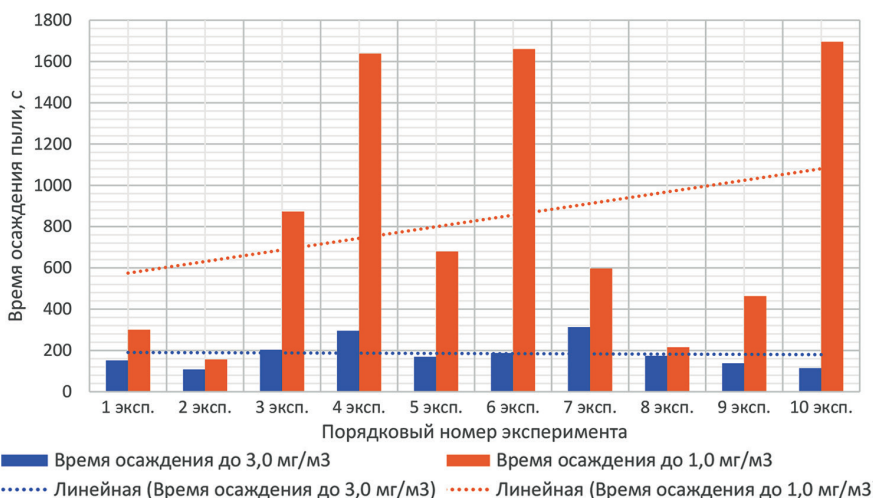


Рис. 4. Гистограммы зависимости времени осаднения пыли до концентрации 3 мг/м^3 и 1 мг/м^3 от проведенных экспериментов

Fig. 4. Bar chart of time of dust deposition to concentrations of 3 mg/m^3 and 1 mg/m^3 in testing

возможности определить концентрацию частичек пыли и жидкости при осаждении отдельно, требовалось исследовать поведение жидкостного аэрозоля и определить время осаждения капель жидкости. Итоги данного эксперимента требуются для определения фоновых концентраций жидкостного аэрозоля.

Эксперимент для определения фоновых концентраций водного аэрозоля проводился при использовании форсунки на 20 мкм (расположена под потолком лабораторной установки и направлена в ее центр), следовательно, дисперсность частиц аэрозоля не более 20 мкм [17, 18]. Время распыления (2 мин) определялось экспериментально для достижения концентрации 15 мг/м³ для согласования со средним максимальным значением пыли при проведении эксперимента по ее осаждению (15 мг/м³). Ниже представлен график зависимости концентрации

водного аэрозоля от времени. Было проведено 10 экспериментов с форсункой 20 мкм. Снижение концентраций для всех 10 экспериментов представлены на графике (рис. 5).

Также для избегания накопления ошибки на приборе эксперименты проводились с обязательным контролем относительной влажности и температуры внутри лабораторного бокса. Условия для каждого последующего эксперимента были одинаковыми. Значения относительной влажности поддерживалось в диапазоне 25–30%, а значения температуры – в диапазоне от 22–25 °С. Скорость движения воздуха также подбиралась исходя из параметров угольной шахты и возможностей установки [19, 20]. Скорость движения воздуха в лабораторном боксе составляла 4 м/с.

Согласно рис. 5, время осаждения жидкостного аэрозоля до наименьшей кон-

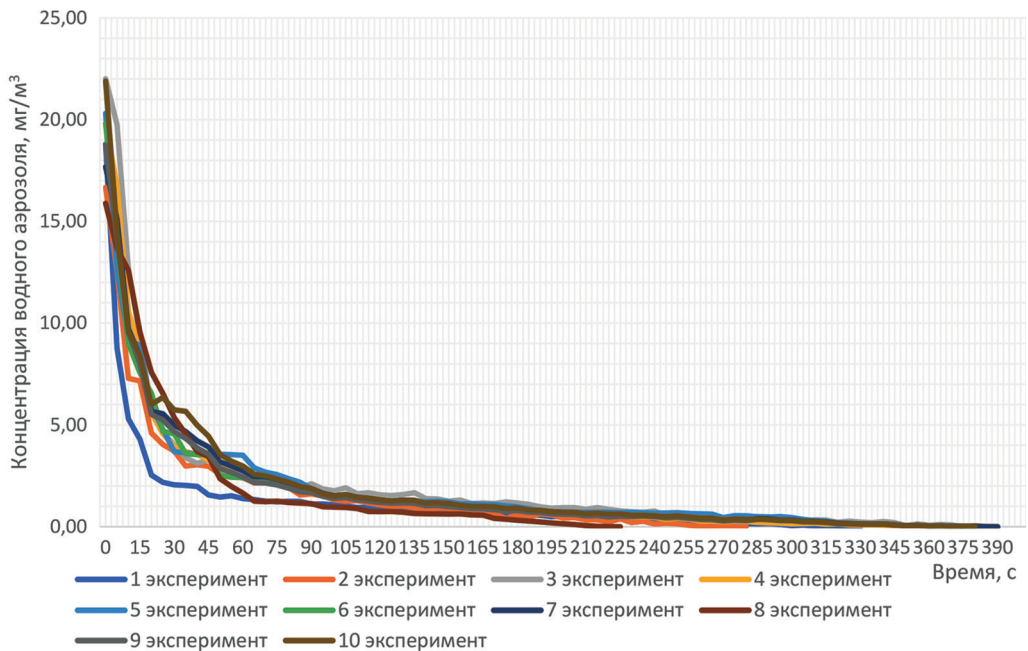


Рис. 5. Зависимость изменения концентрации водяного аэрозоля от времени при орошении в течение 2 мин (дисперсность частиц 20 мкм) с использованием имитатора воздушного потока

Fig. 5. Time change in water aerosol concentration in spraying for 2 min (particle fineness of 20 μm) using air flow simulator

центрации находится в диапазоне от 210 до 390 с, следовательно, частички жидкости размером 20 мкм окажутся на поверхности лабораторного стенда спустя примерно 5 мин после того, как будет отключена установка по орошению.

Для последующего анализа эксперимента по осаждению требуется сопоставить экспериментальные значения, полученные при проведении эксперимента по осаждению угольной пыли и частичек жидкости при орошении, поэтому значения, полученные в 10 экспериментах, были усреднены и сведены в график, представленный на рис. 6. Данный график впоследствии будет использован как фоновое значение распыленного аэрозоля жидкости для анализа эффективности жидкостного орошения угольной пыли.

Также была выражена зависимость (1) снижения концентрации жидкостного аэрозоля от времени осаждения для дальнейшего анализа. Данная формула способна примерно описать поведение частичек аэрозоля жидкости для последующего моделирования:

$$y = -2E - 07x^5 + 4E - 05x^4 - 0,0037x^3 + 0,1422x^2 - 2,5232x + 17,504 \quad (1)$$

где y — значение средней концентрации водного аэрозоля, мг/м³; x — время осаждения частиц водного аэрозоля, с.

Проведение эксперимента по осаждению пылеводяного аэрозоля

Эксперимент по осаждению пылеводяного раствора проводился также с учетом всех параметров пылевоздушной среды лабораторного бокса, моделирующего микроклимат угольной шахты [21]. Осуществлялся контроль:

- влажности воздуха внутри стенда в диапазоне от 25 — 30%;
- температуры воздуха в диапазоне от 22 — 25 °С;
- скорости движения воздуха (4 м/с).

Контроль вышеописанных параметров позволил наиболее корректно провести эксперимент по осаждению для получения наиболее достоверных данных концентрации пылеводяного аэрозоля и

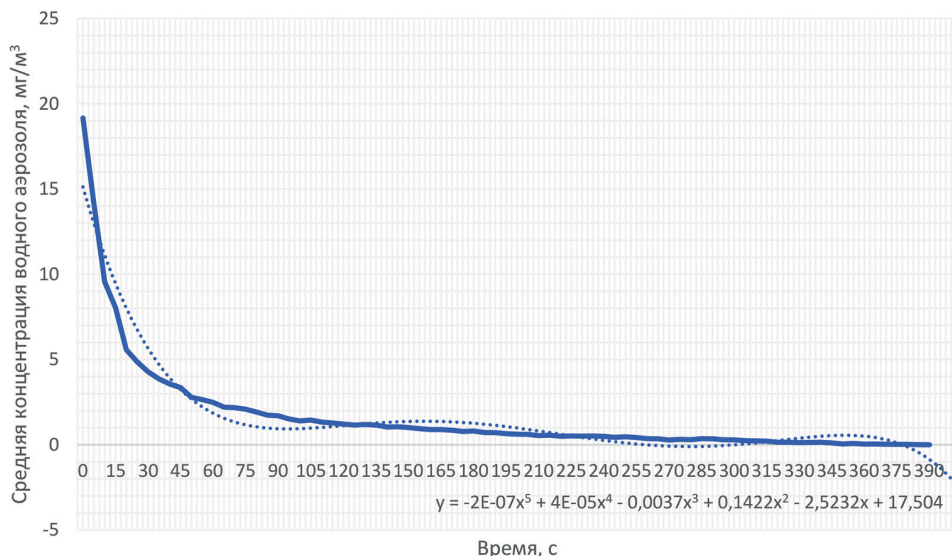


Рис. 6. Зависимость среднего значения концентрации водного аэрозоля от времени осаждения с использованием имитатора воздушного потока

Fig. 6. Average concentrations of water aerosol versus deposition time using air flow simulator

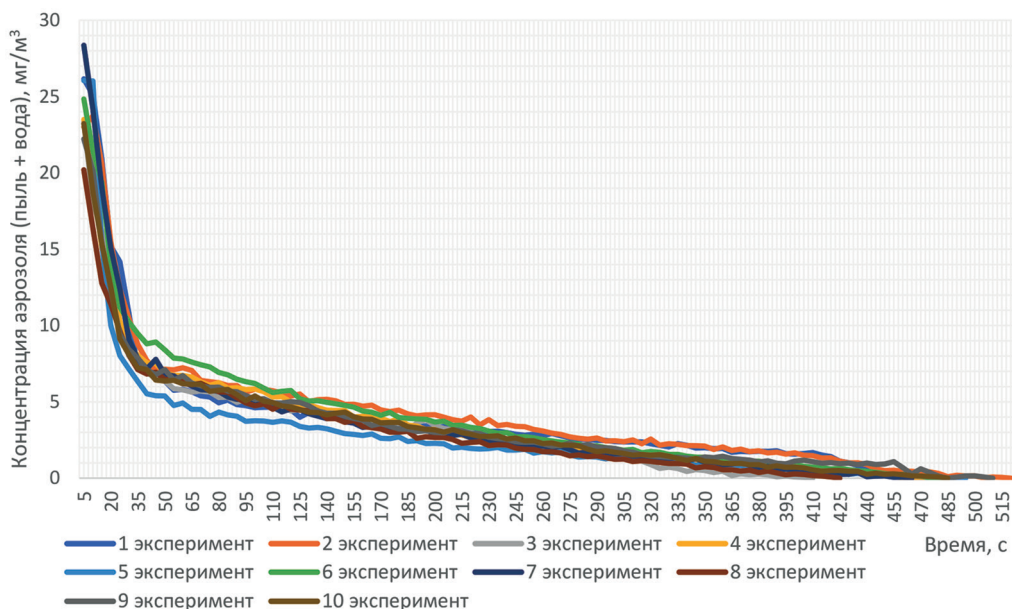


Рис. 7. Зависимость изменения концентрации пылеводяного аэрозоля от времени при орошении в течение 2 мин (дисперсность частиц 20 мкм) с использованием имитатора воздушного потока
 Fig. 7. Time dependence of dust/water aerosol concentration in spraying for 2 min

времени его осаждения. Также для создания схожих условий было проведено 10 экспериментов. Результаты проведения 10 экспериментов представлены в виде графика (рис. 7).

При проведении экспериментов по осаждению пылеводяного раствора частички пыли посредством коагуляции частичками воды осаждаются заметно быстрее, чем при осаждении без участия водного аэрозоля. Временной диапазон осаждения составляет от 410—515 с. Исходя из графика, приведенного выше, частички пыли дисперсностью до 40 мкм, захваченные посредством коагуляции водным аэрозолем с дисперсностью частиц 20 мкм, способны осаждаться до предельно допустимого значения концентрации пылевого аэрозоля в среднем за 8 мин. Время осаждения пыли посредством орошения водным аэрозолем для исследуемых размеров частиц и созданных условий меньше времени осаждения пыли без использования ороше-

ния жидкостным аэрозолем (14,2 мин) примерно в 1,8 раза.

Для определения эффективности пылеосаждения и последующего моделирования был построен график зависимости среднего значения концентрации пылеводяного аэрозоля от времени с использованием воздушного потока (рис. 8) и описана формула зависимости снижения средней концентрации пылеводяного аэрозоля от времени осаждения. Формула, описывающая поведение частичек пылеводяного аэрозоля, приведена ниже (2).

$$y = -6E - 08x^5 + 2E - 05x^4 - 0,0019x^3 + 0,0923x^2 - 2,112x + 21,692 \quad (2)$$

где y — значение средней концентрации пылеводяного аэрозоля, мг/м³; x — время осаждения частиц пылеводяного аэрозоля, с.

Для определения эффективности пылеосаждения требуется учесть фоновое значение жидкости, полученное ранее.

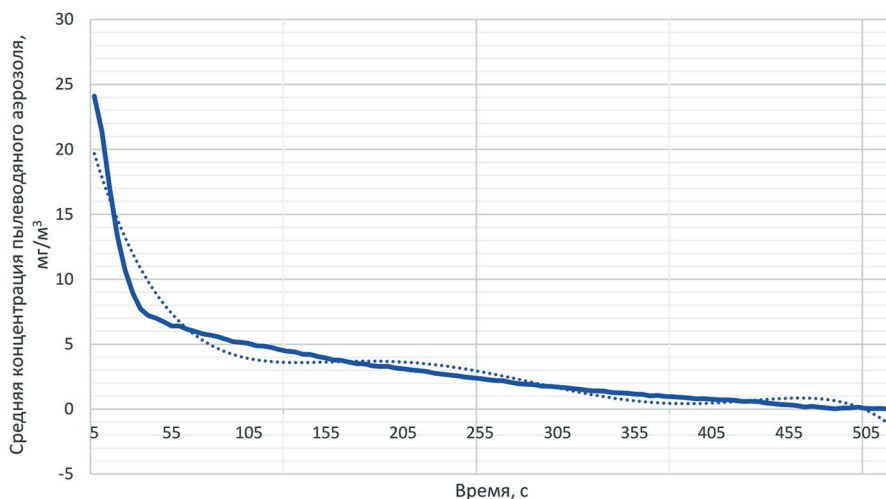


Рис. 8. Зависимость среднего значения концентрации пылеводяного аэрозоля от времени осаждения с использованием имитатора воздушного потока

Fig. 8. Average concentrations of dust/water aerosol versus deposition time using air flow simulator

Результаты усредненных значений концентраций водного и пылеводяного аэрозолей были наложены друг на друга и представлены в виде графика (рис. 9).

Установлено, что значения концентраций и времени, полученные при осаждении частичек жидкости и пылеводяного аэрозоля, разнятся, но сами зависимости похожи. Максимальное отличие наблюдается в период времени от 20 до 300 с

проведения эксперимента. Это связано с увлечением массы исследуемой системы частиц (вода + пылинка).

В дальнейшем, при проведении сравнительного анализа осаждения частичек пыли самостоятельно и с применением орошения, будет рассчитана эффективность метода пылеосаждения при помощи использования жидкостного аэрозоля.

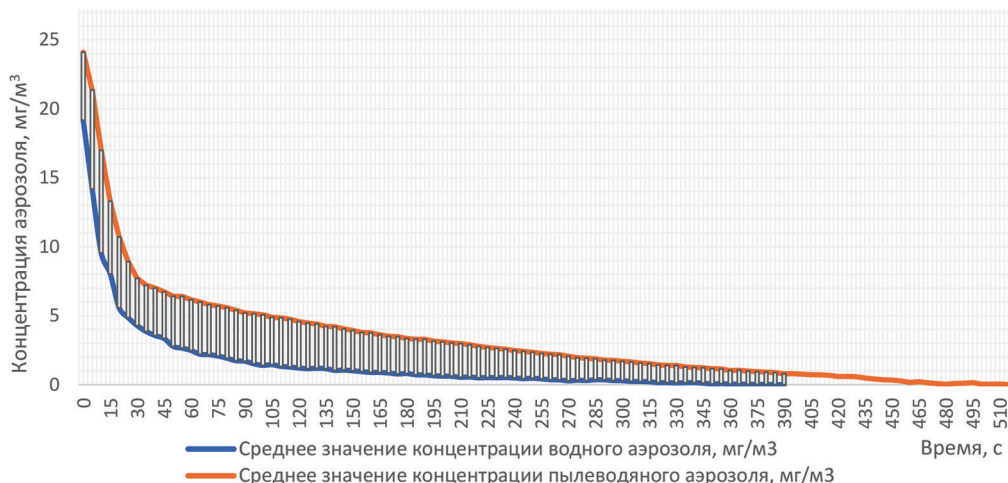


Рис. 9. Зависимость средних концентраций водного и пылеводяного аэрозолей от времени

Fig. 9. Time dependences of average concentrations of water aerosol and dust/water aerosol

Выводы

Исходя из проведенных экспериментов по осаждению пыли, водного и пылеводяного аэрозолей, было определено время осаждения пыли в лабораторном боксе. Пыль осаждается в интервале времени от 600–1100 с с момента начала эксперимента. Несмотря на то, что проводилось измельчение и просеивание пыли, значение дисперсности частиц варьируется от 1 до 40 мкм.

Посредством эксперимента было определено время работы установки по орошению (2 мин). Значение времени засекалось в период набора концентрации пыли до максимального значения (15 мг/м³).

Поскольку используемый в исследовании прибор производит подсчет всех частичек в лабораторном боксе, были определены фоновые значения жидкостного аэрозоля. Среднее время осаждения капель водного аэрозоля с дисперсностью частиц 20 мкм составляет примерно 5 мин. Определена зависимость изменения концентраций водного аэрозоля от времени при орошении с использованием имитатора воздушного потока и зависимость среднего значения концентрации водного аэрозоля от времени, описываемая формулой (1). Скорость воздушного потока в боксе при-

ближена к условиям горных выработок и составляет 4 м/с.

Зафиксированы микроклиматические характеристики условий проведения эксперимента:

- влажность воздуха 25–30%;
- температура воздуха 22–25 °С;

При проведении эксперимента по осаждению пылеводяного аэрозоля установлена зависимость изменения концентраций данного аэрозоля от времени при орошении, с использованием имитатора воздушного потока и зависимость среднего значения концентрации пылеводяного аэрозоля от времени, описываемая формулой (2).

Зафиксировано время осаждения частичек пыли посредством коагуляции каплями воды при орошении. Значение времени составляет примерно 8 мин, что в 1,8 раз быстрее, чем без использования орошения водным раствором (14,2 мин). Также определена корреляция между графиками концентраций средних значений водного и пылеводяного аэрозолей. Максимальное отличие понижения концентраций между двумя видами аэрозолей наблюдается в период времени от 20 до 300 с, что связано с увеличением массы частиц при снижении концентрации пылеводяного аэрозоля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баловцев С. В. Оценка аэрологического риска аварий на выемочных участках угольных шахт, опасных по взрывам газа и пыли // Горный журнал. — 2015. — № 5. — С. 91–93. DOI: 10.17580/gzh.2015.05.19.
2. Скопинцева О. В., Вертинский А. С., Иляхин С. В., Савельев Д. И., Прокопович А. Ю. Обоснование рациональных параметров обеспыливающей обработки угольного массива в шахтах // Горный журнал. — 2014. — № 5. — С. 17–20.
3. Корнев А. В., Ледяев Н. В., Кабанов Е. И., Корнева М. В. Оценка прогнозной запыленности в забоях угольных шахт с учетом особенностей смачиваемости угольной пыли // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 6-2. — С. 115–134. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_115.
4. Smirnyakov V. V., Smirnyakova V. V., Pekarchuk D. S., Orlov F. A. Analysis of methane and dust explosions in modern coal mines in Russia // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2019, vol. 10, no. 2, pp. 1917–1929.

5. Rodionov V., Tumanov M., Skripnik I., Kaverzneva T., Pshenichnaya C. Analysis of the fractional composition of coal dust and its effect on the explosion hazard of the air in coal mines // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022, vol. 981, no. 3, article 032024. DOI: 10.1088/1755-1315/981/3/032024.

6. Zihao Xiu, Wen Nie, Jiayi Yan, Dawei Chen, Peng Cai, Qiang Liu, Tao Du, Bo Yang Numerical simulation study on dust pollution characteristics and optimal dust control air flow rates during coal mine production // Journal of Cleaner Production. 2020, vol. 248, article 119197. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119197.

7. Филин А. Э., Овчинникова Т. И., Зиновьева О. М., Меркулова А. М. Развитие пульсирующей вентиляции в горном производстве // Горный журнал. — 2020. — № 3. — С. 67–71. DOI: 10.17580/gzh.2020.03.13.

8. Скопинцева О. В., Ганова С. Д., Бузин А. А., Федотова В. П. Мероприятия по борьбе с пылью при погрузке и транспортировании твердых полезных ископаемых // Горный журнал. — 2019. — № 12. — С. 76–79. DOI: 10.17580/gzh.2019.12.16.

9. Вишневецкая Е. П., Николаев А. А., Добрякова Н. Н., Банников А. А. Методы оценки смачиваемости углей растворами для пылеподавления // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 5. — С. 17–25. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-17-25.

10. Жолманов Д. К., Зиновьева О. М., Меркулова А. М., Смирнова Н. А. Оценка эффективности системы управления рисками на горнодобывающих предприятиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 10. — С. 166–176. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_10_0_166.

11. Li Q., Wang K., Zheng Y., Ruan M., Mei X., Lin B. Experimental research of particle size and size dispersity on the explosibility characteristics of coal dust // Powder Technology. 2016, vol. 292, pp. 290–297. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.01.035.

12. Харитонов И. Л., Терешкин А. И., Корнев А. В., Коршунов Г. И., Корнева М. В. Разработка мероприятий по улучшению пылевой обстановки в очистных забоях угольных шахт // Безопасность труда в промышленности. — 2019. — № 12. — С. 53–59. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-12-53-59.

13. Zhou G., Luan G., Li S., Liu Zh., Zhang Qi, Miao Ya. Experimental investigation on the micro wettability of coal dust: considering the comprehensive effects of physical chemistry characteristics // Arabian Journal of Geosciences. 2022, vol. 15, article 1102. DOI: 10.1007/s12517-022-10352-7.

14. Han H., Wang P., Liu R., Tian Ch. Experimental study on atomization characteristics and dust-reduction performance of four common types of pressure nozzles in underground coal mines // International Journal of Coal Science & Technology. 2020, vol. 7, pp. 581–596. DOI: 10.1007/s40789-020-00329-w.

15. Филин А. Э., Курносков И. Ю., Колесникова Л. А., Овчинникова Т. И., Колесников А. С. К вопросу моделирования процесса осаждения пыли для условий угольной шахты // Уголь. — 2022. — № 9. — С. 67–72. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-9-67-72.


16. Красилова В. А., Эпштейн С. А., Коссович Е. Л., Козырев М. М., Ионин А. А. Разработка методики измерений гранулометрического состава угольной пыли методом лазерной дифракции // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 2. — С. 5–16. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_5.

17. Pengfei Wang, Han Han, Ronghua Liu, Yongjun Li, Xuanhao Tan Effects of metamorphic degree of coal on coal dust wettability and dust-suppression efficiency via spraying // Advances in Materials Science and Engineering. 2020, vol. 2020, article 4854391. DOI: 10.1155/2020/4854391.

18. Wang J., Zhou G., Wei X., Wang S. Experimental characterization of multi-nozzle atomization interference for dust reduction between hydraulic supports at a fully mechanized coal mining face // Environmental Science and Pollution Research. 2019, vol. 26, no. 10, pp. 10023–10036.

19. Chen B., Wang X., Yuan Y. Adaptive system analysis of coal mine spray dust reduction based on intelligent analysis algorithm / Application of Intelligent Systems in Multi-modal Information Analytics. ICMMIA 2022. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies. 2022, vol. 138. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-05484-6_21.

20. Xiaoxue Liao, Bo Wang, Liang Wang, Jintuo Zhu, Peng Chu, Zibin Zhu, Siwen Zheng Experimental study on the wettability of coal with different metamorphism treated by surfactants for coal dust control // ACS Omega. 2021, vol. 6, no. 34, pp. 21925 – 21938. DOI: 10.1021/acsomega.1c02205.

21. Barone T. L., Hesse E., Seaman S. E., Baran A. J., Beck T. W., Harris M. L., Jaques P. A., Lee T., Mischler S. E. Calibration of the cloud and aerosol spectrometer for coal dust composition and morphology // Advanced Powder Technology. 2019, vol. 30, no. 9, pp. 1805 – 1814. DOI: 10.1016/j.appt.2019.05.023. 

REFERENCES

1. Balovtsev S. V. Aerological risk assessment in working areas of gas and dust explosion-hazardous coal mines. *Gornyi Zhurnal*. 2015, no. 5, pp. 91 – 93. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2015.05.19.

2. Skopintseva O. V., Vertinskiy A. S., Ilyakhin S. V., Savelev D. I., Prokopovich A. Yu. Substantiation of efficient parameters of dust-controlling processing of coal massif in mines. *Gornyi Zhurnal*. 2014, no. 5, pp. 17 – 20. [In Russ].

3. Kornev A. V., Ledyayev N. V., Kabanov E. I., Korneva M. V. Estimation of predictive dust content in the faces of coal mines taking into account the peculiarities of the wettability of coal dust. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6-2, pp. 115 – 134. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_115.

4. Smirnyakov V. V., Smirnyakova V. V., Pekarchuk D. S., Orlov F. A. Analysis of methane and dust explosions in modern coal mines in Russia. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2019, vol. 10, no. 2, pp. 1917 – 1929.

5. Rodionov V., Tumanov M., Skripnik I., Kaverzneva T., Pshenichnaya C. Analysis of the fractional composition of coal dust and its effect on the explosion hazard of the air in coal mines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022, vol. 981, no. 3, article 032024. DOI: 10.1088/1755-1315/981/3/032024.

6. Zihao Xiu, Wen Nie, Jiayi Yan, Dawei Chen, Peng Cai, Qiang Liu, Tao Du, Bo Yang Numerical simulation study on dust pollution characteristics and optimal dust control air flow rates during coal mine production. *Journal of Cleaner Production*. 2020, vol. 248, article 119197. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119197.

7. Filin A. E., Ovchinnikova T. I., Zinovieva O. M., Merkulova A. M. Advance of pulsating ventilation in mining. *Gornyi Zhurnal*. 2020, no. 3, pp. 67 – 71. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2020.03.13.

8. Skopintseva O. V., Ganova S. D., Buzin A. A., Fedotova V. P. Measures to reduce dusting during loading and transportation of solid mineral resources. *Gornyi Zhurnal*. 2019, no. 12, pp. 76 – 79. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2019.12.16.

9. Vishnevskaya E. P., Nikolayev A. A., Dobryakova N. N., Bannikov A. A. Methods for assessing the wettability of coal with dust suppression solutions. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 5, pp. 17 – 25. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-17-25.

10. Zholmanov D. K., Zinovieva O. M., Merkulova A. M., Smirnova N. A. Assessment of risk management efficiency in mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 10, pp. 166 – 176. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_10_0_166.

11. Li Q., Wang K., Zheng Y., Ruan M., Mei X., Lin B. Experimental research of particle size and size dispersity on the explosibility characteristics of coal dust. *Powder Technology*. 2016, vol. 292, pp. 290 – 297. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.01.035.

12. Kharitonov I. L., Tereshkin A. I., Kornev A. V., Korshunov G. I., Korneva M. V. Development of measures on the improvement of dust environment in the coal mines working faces. Oc-

cupational Safety in Industry. 2019, no. 12, pp. 53–59. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-12-53-59.

13. Zhou G., Luan G., Li S., Liu Zh., Zhang Qi, Miao Ya. Experimental investigation on the micro wettability of coal dust: considering the comprehensive effects of physical chemistry characteristics. *Arabian Journal of Geosciences*. 2022, vol. 15, article 1102. DOI: 10.1007/s12517-022-10352-7.

14. Han H., Wang P., Liu R., Tian Ch. Experimental study on atomization characteristics and dust-reduction performance of four common types of pressure nozzles in underground coal mines. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2020, vol. 7, pp. 581–596. DOI: 10.1007/s40789-020-00329-w.

15. Filin A. E., Kurnosov I. Yu., Kolesnikova L. A., Ovchinnikova T. I., Kolesnikov A. S. Description of the methodology for conducting an experiment on dust deposition of mining and metallurgical production. *Ugol'*. 2022, no. 9, pp. 67–72. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-9-67-72.

16. Krasilova V. A., Epshtein S. A., Kossovich E. L., Kozyrev M. M., Ionin A. A. Development of method for coal dust particle size distribution characterization by laser diffraction. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 2, pp. 5–16. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_5.

17. Pengfei Wang, Han Han, Ronghua Liu, Yongjun Li, Xuanhao Tan Effects of metamorphic degree of coal on coal dust wettability and dust-suppression efficiency via spraying. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 2020, article 4854391. DOI: 10.1155/2020/4854391.

18. Wang J., Zhou G., Wei X., Wang S. Experimental characterization of multi-nozzle atomization interference for dust reduction between hydraulic supports at a fully mechanized coal mining face. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019, vol. 26, no. 10, pp. 10023–10036.

19. Chen B., Wang X., Yuan Y. Adaptive system analysis of coal mine spray dust reduction based on intelligent analysis algorithm. *Application of Intelligent Systems in Multi-modal Information Analytics. ICMMA 2022. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. 2022, vol. 138. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-05484-6_21.

20. Xiaoxue Liao, Bo Wang, Liang Wang, Jintuo Zhu, Peng Chu, Zibin Zhu, Siwen Zheng Experimental study on the wettability of coal with different metamorphism treated by surfactants for coal dust control. *ACS Omega*. 2021, vol. 6, no. 34, pp. 21925–21938. DOI: 10.1021/acsomega.1c02205.

21. Barone T. L., Hesse E., Seaman S. E., Baran A. J., Beck T. W., Harris M. L., Jaques P. A., Lee T., Mischler S. E. Calibration of the cloud and aerosol spectrometer for coal dust composition and morphology. *Advanced Powder Technology*. 2019, vol. 30, no. 9, pp. 1805–1814. DOI: 10.1016/j.apt.2019.05.023.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Курносов Илья Юрьевич – аспирант, ассистент,
НИТУ «МИСиС»,
e-mail: kurnosovilya@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-7618-6839.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

I. Y. Kurnosov, Graduate Student, Assistant,
National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia,
e-mail: kurnosovilya@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-7618-6839.

Получена редакцией 16.12.2022; получена после рецензии 21.01.2023; принята к печати 10.02.2023.
Received by the editors 16.12.2022; received after the review 21.01.2023; accepted for printing 10.02.2023.