УДК 504.054

Ю.Д.СМИРНОВ, *канд. техн. наук, доцент, qwerik84@gmail.com*
А.В.ИВАНОВ, *аспирант, andrey-racer@mail.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

Y.D.SMIRNOV, *PhD in eng. sc., associate professor, qwerik84@gmail.com*
A.V.IVANOV, *postgraduate student, andrey-racer@mail.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ФОРСУНКИ ДЛЯ НАИБОЛЕЕ ЭКОНОМИЧНОГО И ЭФФЕКТИВНОГО ПЫЛЕПОДАВЛЕНИЯ

Предложена конструкция пневмогидравлической форсунки-снегогенератора для эффективного и экономичного пылеподавления. Разработано и изготовлено более десяти образцов форсунки и проведены несколько серий экспериментов по определению оптимальных параметров данной конструкции. Изготовлен специальный экспериментальный бункер пылеподавления для установки на конвейерах и проведено несколько серий экспериментов по определению оптимальных параметров бункера и эффективности пылеподавления. На установке была достигнута эффективность пылеподавления 85 %.

***Ключевые слова*:** пылеподавление, форсунка, снег, аэрозоль.

THE IDENTIFICATION OPTIMAL PARAMETERS OF PNEUMOHYDRAULIC SPRAYER FOR THE MOST ECONOMICAL AND EFFECTIVE DUST SUPPRESSION

The construction of pneumohydraulic sprayer-snow generator for effective and economical dust suppression was proposed. Developed and made more than ten sprayer models and was made several series of experiment for identification optimal parameters this construction. There was made special dust suppression bunker and was made several series of experiment for identification optimal parameters bunker and efficiency of dust suppression. With this plant there was efficiency of dust suppression 85 %.

***Key words*:** dust suppression, sprayer, snow, aerosol.

Проблемой большинства горно-обогатительных комбинатов северных регионов России является высокий уровень выбросов пыли в атмосферу, особенно при температуре окружающей среды менее 0 °С [1]. Основными источниками пылеобразования, как при ведении работ, так и после прекращения деятельности карьера, являются различные технологические процессы, внешние и внутренние отвалы, пляжные зоны хвостохранилищ и эрозионные зоны. Сложность моделирования пылевыделения определяется тем, что карьеры расположены в различных климатических районах, имеют различные горно-геологические условия и параметры, отрабатывают полезные ископаемые и вмещающие породы с различными физико-механическими свойствами и минералогическими составами.

Количественные оценки пылеобразования при технологических процессах на горных производствах следующие: при работе станков механического разрушения пород, не оборудованных средствами пылеподав-

ления и пылеулавливания, запыленность воздуха может достигать нескольких сотен миллиграммов на метр кубический; запыленность воздуха при бурении с отсутствием средств пылеулавливания – нескольких тысяч миллиграммов на метр кубический; запыленность воздуха в процессе выемочно-погрузочных работ – 1000 мг/м^3 и более, при работе конвейерного транспорта на узлах перегрузок – 50000 мг/м^3 [2].

В Горном университете был разработан способ круглогодичного пылеподавления с использованием специальных форсунок, которые были изготовлены в учебно-экспериментальных мастерских. Работа форсунки основана на пневмогидравлическом распылении воды в потоке сжатого воздуха. Сжатый воздух проходит через конусообразное сопло Лаваля, адиабатически расширяясь и снижая свою температуру, далее смешивается с водой и выходит через выходной диффузор. Таким образом образуется мелкодиспергированный водный аэрозоль, характерные размеры которого совпадают с размерами мелкодисперсной пыли. Частицы аэрозоля, сталкиваясь с пылинками загрязненного воздуха, за счет сил адгезии образуют тяжелые соединения [3]. Вокруг этих соединений может происходить дальнейшая коагуляция пыли с последующим осаждением. В условиях околонулевой и отрицательной температуры воздуха частицы водного аэрозоля, сталкиваясь с пылинками, образуют снежинки за счет скрытой энергии адиабатического расширения и низкой температуры окружающей среды. Использование снега в условиях околонулевой и отрицательной температуры окружающей среды позволяет избежать обледенения, ухудшения работы и дальнейшего выхода из строя оборудования, находящегося в зоне пылеподавления [3].

Лабораторные испытания проводились с использованием уникального научного оборудования и авторского стенда «Бункер пылеподавления». Проведено несколько серий экспериментов: «летнего» этапа при положительной температуре воздуха и «зимнего» этапа при температуре менее 0 °С.

Одной из важных задач «летнего» этапа экспериментов являлось определение параметров распыления воды с помощью форсунки пылеподавления при разных исходных параметрах, а также оптимальных параметров форсунки для наиболее экономичного и эффективного распыления воды. Эксперимент проводился при температуре окружающей среды 19 °С. Форсунка была установлена горизонтально на высоте 0,7 м от уровня земли. К штуцеру воздуха форсунки был подсоединен шланг от компрессора. В экспериментах использовался поршневой компрессор Fini MK 113-200-5.5, создающий давление воздуха от 1-8 атм. К штуцеру воды был подсоединен шланг от бытовой водопроводной сети давлением 3 атм.

В ходе эксперимента изменялся диаметр сопла Лаваля. Для экспериментов были изготовлены сопла с различными диаметрами проходного отверстия: 1,1; 1,6; 2,2 и 2,7 мм. Также изменялась ширина кольцевой щели для подачи воды, характеризующая объем воды, подаваемой на распыление. Конструкция форсунки предусматривает изменение ширины кольцевой щели для подачи воды (0,75; 1,5 и 2,25 мм) вращением штуцера для подачи воздуха, как механически, так и в автоматическом режиме. Кроме того, изменялось давление воды, подаваемой в форсунку на распыление, путем изменение угла открытия водяного крана бытового трубопровода. На шланге для подачи воды для измерения расхода воды был установлен счетчик МЕТЕР СВ-15Х, поставленный в горизонтальное положение для достижения максимальной точности измерений. Точность измерений данного счетчика 0,0003 м^3 (300 мл). При проведении экспериментов измерялась также длина водяного факела. Дисперсность водного аэрозоля оценивалась зрительно на контрастном фоне.

Экспериментальные исследования (табл.1) показали, что для данной конструкции форсунки наиболее пригодный для пылеподавления мелкодисперсный водный аэрозоль образовывается при использовании сопла Лаваля с диаметром 1,1 мм, ширине кольцевой щели 0,75 мм, расходе воды 30 мл/с. Полученный водяной факел представляет собой мелкодиспергированный

аэрозоль, с углом распыления на расстоянии 2 м до 40°, длина факела достигает 2,5 м. Сопло Лаваля с диаметром 1,1 мм позволяет говорить о малом расходе воздуха и работе компрессора до 40 % времени.

«Зимняя» серия экспериментов проводилась при использовании специального бункера пылеподавления и отрицательной температуре воздуха. Бункер пылеподавления представляет собой металлический

Таблица 1

Результаты «летней» серии экспериментов

AC, мм	S_2, мм	α, град	Δ, $м^3 \cdot 10^4$	Q_2, $(м^2 \cdot 10^6)/с$	l, м	Характеристики распыления
Сопло с площадью отверстия $S_1 = 0{,}95$ мм^2						
0,75	11,61	20	–	–	2	Мелкодисперсное
		30	15	25	3	Струя, туман
		45	20	33	4,5	Струя, туман
		60	17	56	4	Струя
		75	17	56	2,5	Струя
		90	17	56	2,5	Струя
1,5	23,36	20	3	3	4,5	Крупнодисперсное
		30	15	50	4,5	Струя
		45	40	133	5	Струя
		60	28	186	6	Струя
		75	30	200	–	–
		90	30	200	–	–
2,25	35,25	20	3	10	4,5	Крупнодисперсное
		30	15	50	4,5	Крупнодисперсное, капли
		45	40	133	5	Струя
Сопло с $S_1 = 2{,}01$ мм^2						
0,75	11,61	20	3	10	2,5-3	Мелкодисперсное
		30	10	33	3	Крупнодисперсное, капли
		45	22	146	5	Струя
		60	27	186	-	–
1,5	23,36	20	4	13	2-2,5	Мелкодисперсное
		30	23	77	3-3,5	Крупнодисперсное, капли
		45	47	157	4,5	Струя
2,25	35,25	20	4	13	3-3,5	Мелкодисперсное
		30	18	60	3,5-4	Крупнодисперсное, капли
		45	47	157	3,5-4	Струя
Сопло с $S_1 = 3{,}80$ мм^2						
0,75	11,61	20	2	7	4	Мелкодисперсное, туман
		30	23	77	5-6	Мелкодисперсное, туман
		45	31	103	5-5,5	Струя, туман
		60	–	–	6	Струя
1,5	23,36	20	5	17	3,5-4	Мелкодисперсное, туман
		30	24	80	3,5-4	Крупнодисперсное
		45	51	170	5-5,5	Крупнодисперсное, капли
		60	–	–	6-6,5	Крупнодисперсное, капли
2,25	35,25	20	5	17	4	Крупнодисперсное
		30	28	93	4,5-6	Крупнодисперсное, капли
		45	66	220	4-4,5	Струя, капли
		60	–	–	5-5,5	Струя, капли
Сопло с $S_1 = 5{,}72$ мм^2						
0,75	11,61	20	4	13	4-4,5	Избыток воздуха, туман
		30	20	67	5-5,5	Мелкодисперсное, насыщенный туман
		45	35	117	4,5	Крупнодисперсное, капли
		60	–	–	5-5,5	Крупнодисперсное, капли
1,5	23,36	20	5	17	5,5-6	Мелкодисперсное
		30	25	83	6-6,5	Крупнодисперсное, туман
		45	50	167	6-6,5	Крупнодисперсное, капли
		60	–	–	7-7,5	Крупнодисперсное, капли

Окончание таблицы 1

AC, мм	S_2, мм	α, град	Δ, $м^3 \cdot 104$	Q_2, $(м^2 \cdot 10^{-6})/с$	l, м	Характеристики распыления
2,25	35,25	20	14	47	4,5-5	Мелкодисперсное
		30	28	93	6	Крупнодисперсное
		45	60	200	5	Крупнодисперсное, капли

Примечания. 1. α – угол поворота водяного крана, характеризующий количество подаваемой в форсунку воды, град; Δ – разница между конечным и начальным показанием счетчика воды, $м^3$; l – длина водного факела (водной струи), м; AC – ширина кольцевой щели для подачи воды, мм; S_2 – площадь кольцевой щели, $мм^2$; Q_2 – расход воды, $м^3/с$.

2. Характеристика распыления: мелкодисперсное – мелкодисперсное распыление воды, образование тумана и его зависимость от скорости и направления ветра; крупнодисперсное – крупнодисперсное распыление воды, отсутствие тумана, отсутствие зависимости от ветра; туман – высокий уровень образования тумана; капли – капель из диффузора форсунки в результате неполного распыления воды; струя – водная струя на выходе из диффузора, отсутствие распыления воды; избыток воздуха – ненасыщенное распыление.

кожух, являющийся аналогом конструкции, располагаемой над конвейерной лентой в натуральную величину. Размеры бункера пылеподавления 1200×1000×1500 мм. Ширина бункера выбиралась с учетов ширины ленты конвейера. В бункере устанавливается форсунка пылеподавления так, что водяной факел падает на проходящую по конвейеру породу с различных точек на гранях бункера (сверху, сбоку, под наклоном). Бункер был изготовлен в натуральную величину из оргстекла (для возможности наблюдения) и листового железа. На крышке бункера имеется три точки крепления форсунки: на боковой наклонной стенке, на боковой вертикальной стенке, на верхней стенке. Также бункер имеет возможность регулирования высоты благодаря съемным стенкам, (0,2; 0,4; 0,6; 0,8 и 1 м). В нижней части бункер имеет отверстие с размерами 200×900 мм. На это отверстие были установлены три пылесоса Буран-800, работающие в режиме нагнетания. Пылесосы имитировали скорость движения конвейера 4,5 м/с. Форсунка была размещена на боковой части бункера пылеподавления под наклоном к потоку воздуха 45 °.

Навески цементной пыли массой по 50 г распылялись в потоке воздуха пылесоса, стоящего по центру. Поток запыленного воздуха проходил через поток водного аэрозоля создаваемого форсункой, наблюдался процесс пылеподавления. На выходе в десяти точках с помощью пылемера TSI DustTrak 8520 Aerosol Particulate Monitor (США) замерялся уровень запыленности. Данная модель пылемера позволяет проводить замеры запыленности по фракциям пыли трех размерностей: 1; 2,5 и 10 мкм. Замеры пылемером производились в реальном времени с измерением показателя с интервалом в 1 с. В таблицу полученных данных заносились максимальные значения запыленности (табл.2). Расстояние точек замера запыленности от бункера указаны на рисунке.

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод о том, что для бункера данных размеров (следовательно, и для конвейера данных размеров) использования одной форсунки недостаточно. Сравнивая замеры запыленности до пылеподавления и после, получаем среднюю эффективность 50 %. Малая эффективность обусловлена размерами водяного факела на дне бункера – 350-400 мм в диаметре. Таким образом, максимальная эффективность пылеподавления при использовании одной форсунки достигается при ширине зоны пылеподавления до 450-500 мм. При использовании двух форсунок, равномерно размещенных на боковой части бункера, эффективность пылеподавления достигает уже 85 %, но увеличивается расход воды и воздуха, что экономически неэффективно.

В настоящее время на современных предприятиях для увеличения эффективности пылеподавления используют от четырех до шести форсунок спринклерного типа. Дальнейшей задачей проводимых исследований является выявление рационального расположения минимального количества

Таблица 2

Результаты «зимней» серии экспериментов

Высота бункера, м	Точка замера	Диаметр измеряемой фракции пыли, мкм	Концентрация пыли в точках замера, мг/м3									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I	I	1	34,9	17	32,2	4,60	5,69	26,3	2,69	0,62	18,0	3,59
		2,5	65,9	17,8	33,3	4,20	1,02	22,0	3,53	4,17	18,8	7,28
		10	74,8	20,4	49,7	0,78	4,99	31	7,27	6,15	32	11,9
0,8	I	1	18,9	6,75	11	2,24	5,58	6,79	4,05	1,35	6,10	2,25
		2,5	32,9	12,9	29,4	4,13	13,8	23,2	3,21	4,02	15,1	4,17
		10	19,4	10,3	24,1	24,3	15,9	32,7	10,8	6,72	16,6	14,3
	II	1	14,7	5,83	9,99	1,88	4,56	5,99	2,36	1,62	6,13	1,35
		2,5	17,3	9,87	15,1	2,28	5,96	12,6	1,92	2,25	8,08	2,25
		10	10,5	20,8	36,6	12,6	13,1	24,8	5,04	2,55	13,3	7,08
Без пылеподавления		1	25	9,91	17	3,21	7,82	32,1	13,1	8,98	34,4	7,56
		2,5	25,8	14,8	22,7	3,69	8,95	16,4	2,57	2,94	10,5	3,10
		10	25,3	10,3	18	6,78	3,23	19,2	6,25	3,12	36,1	5,56

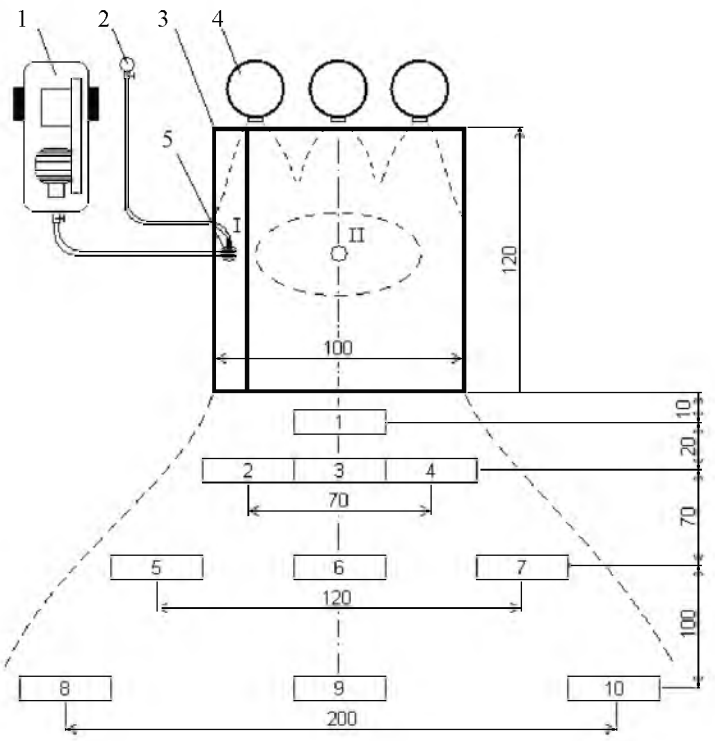


Рис.1. Схема установки и расположения точек замера запыленности от бункера пылеподавления

1 – воздушный компрессор, создающий давление воздуха 8 атм; 2 – водяной кран с давлением воды 3 атм; 3 – бункер пылеподавления; 4 – пылесосы, используемые для создания потока воздуха в бункере, имитирующего скорость движения конвейера 4 м/с; 5 – форсунка пылеподавления; I и II – точки замеров (см.табл.2)

разработанных нами пневмогидравлических форсунок для установки их в опытном бункере пылеподавления.

Научно-исследовательская работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы», Правительства г. Санкт-Петербурга, и Американского фонда гражданских некоммерческих исследований CRDF; в Центре коллективного пользования научным оборудованием Горного университета при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Смирнов Ю.Д.* Рациональная организация добычи полезных ископаемых в карьерах со сложными условиями труда горнорабочих / Ю.Д.Смирнов, А.П.Бульбашев, Н.А.Гаспарьян, С.В.Ковшов, А.Н.Никулин, Ю.В.Шувалов. СПб, 2009. 464 с.

2. *Смирнов Ю.Д.* Проблема воздействия промышленной пыли на работников предприятий минерально-сырьевого комплекса и рациональный путь ее решения / Ю.Д.Смирнов, А.В.Иванов // Экология-2010: Сбор. мат. конф. Уфа, 2010. С.100-106.

3. *Смирнов Ю.Д.* Проблема пылевого загрязнения атмосферы на предприятиях минерально-сырьевого комплекса и рациональный путь ее решения / Ю.Д.Смирнов, А.В.Иванов // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: Мат. 6-й Междунар. конф. по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики, Тула, 2010. С.269-276

REFERENCES

1. *Smirnov Y.D.* Rational organization of minerals extraction in open-cast with difficult conditions of work of miners / U.D.Smirnov, A.P.Bulbashev, N.A.Gasparian, S.V.Kovshov, A.N.Nikulin, U.V.Shuvalov. Saint Petersburg, 2009. 464 p.

2. *Smirnov Y.D.* Problem influence of industrial dust to workers of mining factory and rational way of solution / U.D.Smirnov, A.V.Ivanov // Ecology-2010: Collection of conf. Ufa, 2010. P.100-106.

3. *Smirnov Y.D.* Problem of dust pollution air in mining factory and rational way of solution / U.D.Smirnov, A.V.Ivanov // Social-economical and ecological problems of mining industry, building and energetic: mat. of 6th International conf. about problems of mining industry, building and energetic. Tula, 2010. P.269-276.