

4. Про визначення категорій складності об'єктів будівництва / Мінрегіонрозвитку та будівництва України: Введ. 04.04.2011. – №24-10/2759/0/6-11. – К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України.

5. Симоненко В.І. Екологічні проблеми розробки скельних будівельних матеріалів в районах прилеглих до житлових забудов [текст] /В.І. Симоненко, С.В. Пацьора, В.Ю. Швець, З.В. Воропаєва // Науковий вісник НГУ. – 2009. – №3– С.12-16.

6. Симоненко В.И. Технологические решения снижающие воздействие горного производства на природную среду при разработке гранитных месторождений Украины [текст] /В.И. Симоненко, А.В. Черняев, А.В. Мостыка, С.В. Пацьора / Проблемы открытой разработки месторождений полезных ископаемых: мат-лы международной науч.-техн. конф. 29-30 ноября 2007г., г.Екатеринбург (Хохряковские чтения, посвященные памяти проф. В.С. Хохрякова) – Екатеринбург: изд-во УТГУ, 2010. – С.284-289.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Голіньком В.І.
Надійшла до редакції 25.07.2012*

УДК 622. 807

© А.А. Юрченко

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАХВАТА АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ КАПЛЯМИ ВОДЫ ПРИ ОРОШЕНИИ

Наведені результати теоретичних досліджень коефіцієнта захвату часток пилу краплями води при зрошуванні пилової хмари. Розраховані його значення для часток залізорудного пилу різних фракцій і діаметрів водяних крапель.

Приведены результаты теоретических исследований коэффициента захвата частиц пыли каплями воды при орошении пылевого облака. Рассчитаны его значения для частиц железорудной пыли различных фракций и диаметров водяных капель.

The results of theoretical researches of coefficient of capture of particles of soaring dust are resulted by drops of water at irrigation of dust cloud. His values for the particles of ferroordust of different fractions and diameters of aquatic drops are expected.

Введение. Технологические процессы многих отраслей промышленности сопровождаются значительным пылеобразованием. Наиболее широко распространенным методом пылеподавления является орошение запылённой атмосферы в месте образования пылевого облака. При этом основным параметром орошения является эффективность пылеподавления, которая в общем случае определяется способностью улавливания пылевых частиц диспергированной водой [1, 2, 3] Эта способность характеризуется коэффициентом захвата пылинок сферической каплей воды.

Постановка задачи. При решении вопросов организации пылеподавления путём орошения пылевого облака необходимо установить, какие размеры капель воды наиболее эффективно улавливают частицы взвешенной пыли. Кроме этого, капли воды определённого диаметра не одинаково улавливают частицы пыли различных фракций. Все эти факторы учитывает суммарный коэффициент захвата

пыли каплями воды. В работе поставлена задача разработки методики расчёта коэффициента захвата пыли частицами воды при орошении пылевого облака.

Изложение материала исследований. При совместном движении капель жидкости и твёрдых частиц на пылинку действуют силы тяжести и инерции, а также аэродинамические силы. При сближении пылинки с каплей на расстояние 3-4 радиусов последней начинают действовать электростатические силы, а для мелких пылинок (менее 5 мкм) при небольших скоростях движения проявляются диффузионные силы.

Для эффективного улавливания витающих частиц диспергированной жидкостью необходимо выполнение четырёх последовательных стадий:

- встреча пылинки с каплей на пути своего движения;
- соприкосновение пылинки с каплей;
- смачивание и захват пылинки каплей;
- соединение капли с уловленными пылинками.

Первая стадия процесса гидрообеспыливания орошением происходит при сближении (встрече) капли с частицей пыли до расстояний, на которых начинают действовать молекулярные силы (80 нм). На этой стадии на пылинку действуют инерционные, электростатические и аэродинамические силы.

Вторая стадия предполагает соприкосновение пылинки с каплей до возникновения прочного контакта между ними. В противном случае пылинка за счёт эффекта аэродинамического и молекулярного обтекания отрывается от капли. Основное влияние при этом оказывают адгезионные, инерционные и молекулярные силы.

Процесс смачивания и захвата пылинки каплей характеризует третью стадию процесса. На этой стадии основную роль играют силы адгезии и инерции, а захват осуществляется в основном под действием силы гравитации частицы.

Четвёртая стадия определяет оседание образовавшихся конгломератов пыль-капля за счёт сил гравитации согласно закону Стокса.

Все эти процессы комплексно учитывает суммарный коэффициент захвата пылевой частицы сферической каплей жидкости, который может быть определён как отношение числа частиц пыли, соударяющихся с каплей жидкости, к числу частиц, которые соударялись бы, если линии тока не отклонялись бы каплей (рис.1).

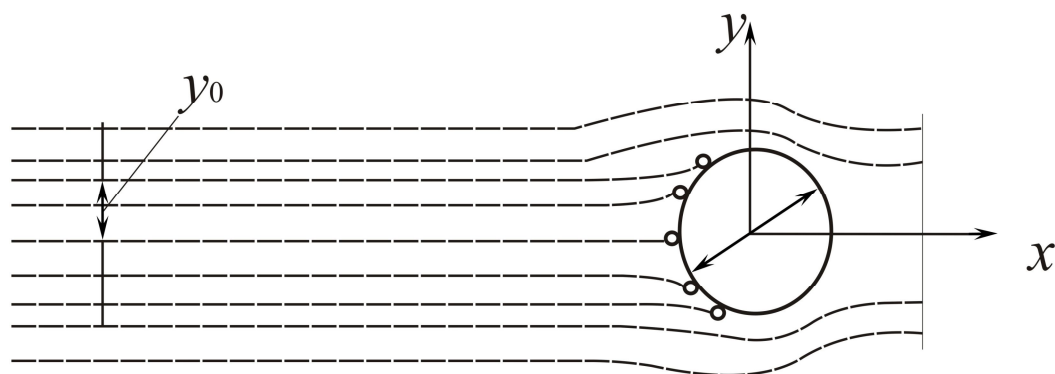


Рис.1. Линии тока воздуха и траектории частиц при обтекании капли.

На эффективность захвата каплей частиц пыли влияют три фактора: 1 - поле течения или распределение скоростей течения среды вблизи капли; 2 - траектория частицы, зависящая от её массы, сопротивления среды её движению, размера и скорости осаждения капли жидкости; 3 - прилипаемость частиц к капле.

Суммарный коэффициент захвата представляет собой комплексный параметр, определяемый механизмом взаимодействия капель с частицей пыли и прочностью захвата. В большинстве работ [4, 5, 6, 7], посвященных анализу орошения как процессу, при котором происходит прочёсывание пылевого облака падающими каплями жидкости, предполагается, что поток воздуха стационарен относительно капли, массовая концентрация пыли не влияет на движение воздуха и на движение каждой из частиц, размер капель много больше размера частиц пыли, форма частиц сферическая и т.д.

Скорость движения капель жидкости в процессе орошения облака обусловлена силами гравитации и зависит от их диаметра. При движении водяных капель в гравитационном поле их скорость отличается от скорости осаждения пылевых частиц, начиная с размера капель $r \geq 0,4$ мм [6]. С увеличением размера капли растёт скорость её падения. При $r > 2$ мм увеличение скорости прекращается из-за деформации капель, которая при $r = 2,5-3$ мм приводит к их разрыву.

Расстояние между пылевыми частицами в пылевом облаке можно определить по формуле, предложенной в работе [6]:

$$l_{cp} = 0,8d(\rho_c / C)^{1/3}, \quad (1)$$

где l_{cp} - среднее расстояние между частицами в аэрозолях, мкм; d - диаметр частиц, мкм; ρ_c - плотность частиц, кг/м³; C - массовая концентрация, кг/м³.

Установлено, что расстояние между аэрозольными частицами значительно больше их размера. Поэтому процесс движения каждой частицы в первом приближении можно считать независимым.

Эффективность осаждения частиц на каплях жидкости (кинематическая коагуляция) зависит прежде всего от величины их относительной скорости движения

$$\omega = u - g,$$

где u, g - скорость осаждения пылевой частицы и капли воды соответственно, м/с. В этом случае число пылевых частиц, захваченных одной каплей в 1с можно определить по формуле [6]:

$$Q = \frac{1}{4} n \pi d_k^2 \omega \eta_\Sigma, \quad (2)$$

где n - счётная концентрация пылевых частиц в облаке, 1/м³; d_k - диаметр капли, м; η_Σ - суммарный коэффициент захвата частиц сферической каплей.

Эффективность улавливания аэрозолей, согласно расчётам Фукса [6], прежде всего, определяется размером частиц. В случае малых относительных скоростей для частиц малых размеров (1-2 мкм), - чем крупнее капли, тем эффективность улавливания выше. Захват частиц каплями зависит от нескольких факторов. Здесь наряду с кинематической действует градиентная коагуляция. Выделим элемент пылегазового облака размером $dl db dh$ (Рис.2)[5].

На верхнюю грань поступает поток капель, объёмный расход которого равен

$$V_{жс} = \alpha \vartheta (dl db), \quad (3)$$

где α – доля выделенного объёма, занимаемого каплями; ϑ – скорость движения капель, м/с.

На эту же грань поступают частицы пыли. Если массовая концентрация пыли на входе в выделенный объём равна C , мг/м³, то поток пыли на входе q_1 , мг/с, составит

$$q_1 = u (dl db) C, \quad (4)$$

где u – скорость частиц пыли, м/с.

На выходе из элементарного объёма газ будет содержать $C - dC$ мг/м³ пыли, а поток пыли q_2 в мг/м³ составит соответственно

$$q_2 = u (dl db) (C - dC), \quad (5)$$

где dC – часть потока пыли, захваченная каплями жидкости, мг/с.

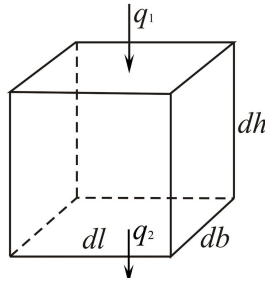


Рис. 2. Элементарный объём запыленного воздуха

Осаждение частиц пыли на каплях происходит с относительной скоростью $\omega = u - \vartheta$. Согласно [5], на одной капле диаметром d_k при эффективности захвата η_Σ осаждается частиц массой – $C \omega \pi d_k^2 \alpha \eta_\Sigma / 4$. Всего в выделенном объёме находится капель

$$\frac{6 (dl db dh) \alpha}{\pi d_k^3}. \quad (6)$$

Таким образом, в единицу времени на каплях задержится пыли:

$$q_3 = \frac{6 \pi d_k^2 \alpha \omega C \eta_\Sigma}{4 \pi d_k^3} (dl db dh) = \frac{3}{2} \frac{\alpha \omega C \eta_\Sigma}{d_k} (dl db dh). \quad (7)$$

Запишем уравнение баланса пыли для элементарного объёма

$$q_1 - q_2 - q_3 = 0.$$

После подстановки в это выражение значений пылевых потоков для выделенного объёма получим:

$$u (dl db) C - u (dl db) (C - dC) - \frac{3}{2} \frac{\alpha \omega C \eta_\Sigma}{d_k} (dl db dh) = 0 \quad (8)$$

После сокращений получим:

$$\frac{dC}{C} = \frac{3}{2} \frac{\alpha \eta_\Sigma}{d_k} \frac{\omega}{u} dh. \quad (9)$$

Введём показатель орошения облака m , м³/м³, как отношение объёмных

расходов жидкости и пыли:

$$m = \frac{V_{жс}}{Vч} = \frac{\alpha \vartheta dl db}{u dl db} = \frac{\alpha \vartheta}{u},$$

то есть $mu = \alpha g$, или $\frac{\alpha}{u} = \frac{m}{g}$, откуда $\frac{\alpha \omega}{u} = m \frac{\omega}{g}$.

С учётом этого выражение (9) примет вид:

$$\frac{dC}{C} = \frac{3}{2} \frac{\eta_{\Sigma}}{d_k} \frac{\alpha \omega}{u} dh = \frac{3}{2} m \frac{\omega}{g} \frac{\eta_{\Sigma}}{d_k} dh \quad (10)$$

После интегрирования (10) по всей высоте пылевого облака H эффективность пылеулавливания $\eta = \frac{dC}{C}$ каплями жидкости примет вид:

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{3}{2} m \frac{\omega}{g} \frac{H}{d_k} \eta_{\Sigma}\right). \quad (11)$$

Согласно (11), эффективность пылеулавливания повышается при увеличении суммарного коэффициента захвата частиц сферической каплей η_{Σ} , высоты контакта жидкости с облаком H , относительной скорости движения капли и пылевой частицы ω , показателя орошения пыли m .

Техническими методами можно повышать эффективность пылеулавливания за счет повышения суммарного коэффициента захвата пылевых частиц сферической каплей и показателя орошения пыли, который определяется возможностями средств доставки жидкости. Остальные параметры в выражении (11) обусловлены технологией разрушения горного массива и аэродинамическими параметрами атмосферного воздуха.

При инерционном осаждении частиц пыли на капле коэффициент захвата η_{Σ} зависит от числа Стокса (K) и режима течения воздуха, обтекающего каплю. Критическое значение K , при котором частицы пыли начинают захватываться каплей при потенциальном течении, равно $1/12$ [5, 7], то есть $\eta_{\Sigma} = 0$, если $K < 1/12$. При возрастании числа Стокса для расчёта коэффициента захвата Ленгмюром предложены следующие формулы:

$$\begin{aligned} a) \eta_{\Sigma} &= 0 && \text{если } K < 0,083 \\ б) \eta_{\Sigma} &= K^2 / (K + 0,5)^2; && \text{если } K > 0,2 ; \\ в) \eta_{\Sigma} &= [1 + 0,75 \ln 2K / (K - 1,214)]^{-2}; && \text{если } K > 1,214. \end{aligned} \quad (12)$$

Приведенные формулы позволяют рассчитать коэффициент захвата частиц пыли каплями при орошении. Для этого необходимо определить значения числа Стокса по выражению [5]:

$$K = \frac{\rho_c g \omega d_i^2}{18 \mu d_k}, \quad (13)$$

где ρ_c – плотность пылевой частицы, кг/м³; ω – относительная скорость капли, м/с; d_i – диаметр частиц i -ой фракции, м; d_k – диаметр капель, м.

Расчёты коэффициента захвата частиц пыли каплями при орошении начнём с определения скорости оседания капель жидкости для фиксированных диаметров капель: 20; 50; 100; 300; 600; 1000; 1500; 2000; 2500 мкм. В неподвижном воздухе капля при свободном падении быстро достигает такой постоянной скорости, при которой аэродинамическое сопротивление, действующее на каплю, становится равным её весу. Если пренебречь значением плотности воздуха и влиянием инер-

ции воздуха, вытесненного частицей пыли, то скорость осаждения шаровидной капли можно вычислить по закону Стокса [6]:

$$u = \frac{\rho g d_k^2}{18\mu},$$

где ρ – плотность капли, кг/м³; d_k – диаметр капли, м; $\mu = 181,9 \cdot 10^{-7}$ Н·с/м² – динамическая вязкость воздуха.

Для выбранных диаметров капель результаты расчётов скорости их осаждения в стоксовской и надстоксовской областях приведены в табл. 1.

Таблица 1

Скорость осаждения капель воды

Диаметр капль, м	Скорость осаждения по Стоксу, $u = \frac{g\rho d_k^2}{18\mu}$, м/с	Число Рейнольдса $Re = \frac{\rho_0 u d_k}{\mu}$	Число Архимеда $Ar = \frac{d_k^3 \rho_0^2 (\rho - \rho_0) g}{\mu^2}$	Число Re для надстоксовских частиц $Re = \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}}$	U, м/с, Для надстоксовских частиц $u = \frac{Re \mu}{\rho_0 d_k}$
$20 \cdot 10^{-6}$	0,012	$0,016 < 1$	-	-	-
$50 \cdot 10^{-6}$	0,075	$0,25 < 1$	-	-	-
$100 \cdot 10^{-6}$	0,299	$1,07 > 1$	42,6	0,968	0,147
$300 \cdot 10^{-6}$	2,69	$5,32 > 1$	1150,2	29,73	1,50
$600 \cdot 10^{-6}$	10,76	$42,6 > 1$	9201,6	158,29	4,00
$1000 \cdot 10^{-6}$	29,90	$197,0 > 1$	42600,0	284,19	4,31
$1500 \cdot 10^{-6}$	67,28	$665,0 > 1$	143775,0	576,97	6,04
$2000 \cdot 10^{-6}$	119,60	$1576,3 > 1$	340800,0	926,59	7,03
$2500 \cdot 10^{-6}$	186,87	$3078,8 > 1$	665625,0	1290,57	7,83

По этой же методике рассчитаем скорость осаждения частиц пылевого облака. Расчёты проводим для средних значений диаметров частиц монодисперсных пылевых облаков. Результаты расчётов приведены в табл.2.

Таблица 2

Скорость осаждения частиц среднего диаметра

Показатели	Диаметр пылевых частиц						
	1	3	7	13	23	38	73
$g_{oc}, м/с$	0,00012	0,00108	0,00587	0,0202	0,0633	0,173	0,638

По выражению (13) вычисляем значение числа Стокса при орошении частиц пыли диаметром 1; 3; 7; 13; 23; 38; и 73 мкм для принятых значений диаметров капель воды. Результаты расчётов сводим в табл. 3.

Теперь имеются все исходные данные для вычисления суммарного коэффициента захвата η_{Σ} для частиц пыли среднего диаметра при изменении диаметра капель воды в исследуемом диапазоне. Расчёт значений суммарного коэффициента захвата осуществляем по выражению (12) и его результаты приводим в табл. 4.

Таблица 3

Значения числа Стокса для частиц пыли среднего диаметра при исследуемых диаметрах капель воды

Диаметр частиц, мкм		Диаметр капель воды, мкм								
		20	50	100	300	600	1000	1500	2000	2500
1	ω	0,012	0,075	0,147	1,50	4,00	4,31	6,04	7,03	7,83
	K	0,160	0,402	0,397	1,35	1,79	1,16	1,15	0,95	0,84
3	ω	0,011	0,074	0,146	1,50	4,00	4,31	6,04	7,03	7,83
	K	0,593	1,595	1,574	5,390	7,187	4,646	4,341	3,789	3,376
7	ω	0,006	0,069	0,141	1,49	3,99	4,30	6,03	7,02	7,82
	K	3,96	18,20	20,83	83,55	87,70	56,73	53,03	46,30	41,30
13	ω	-	0,055	0,127	1,48	3,98	4,29	6,02	7,01	7,81
	K	-	22,27	25,71	99,86	134,28	86,84	81,24	70,95	63,24
23	ω	-	0,012	0,084	1,437	3,94	4,25	5,98	6,97	7,77
	K	-	15,21	53,23	304,15	416,09	269,30	252,61	220,82	196,93
38	ω	-	-	-	1,33	3,83	4,14	5,87	6,86	7,66
	K	-	-	-	776,8	1104,1	716,1	676,9	593,3	530,0
73	ω	-	-	-	0,86	3,36	3,67	5,40	6,39	7,19
	K	-	-	-	1829,8	3574,5	2342,6	2297,9	2039,4	1835,8

Таблица 4

Значения суммарного коэффициента захвата пылевых частиц среднего диаметра для исследуемых диаметров водяных капель

Диаметр пылевых частиц, мкм	Диаметр капель, мкм								
	20	50	100	300	600	1000	1500	2000	2500
1	0,059	0,199	0,196	0,024	0,141	0,488	0,486	0,429	0,393
3	0,294	0,093	0,087	0,491	0,561	0,452	0,434	0,396	0,361
7	0,408	0,745	0,765	0,912	0,916	0,883	0,878	0,865	0,853
13	-	0,784	0,795	0,924	0,941	0,916	0,910	0,908	0,892
23	-	0,815	0,878	0,969	0,976	0,965	0,963	0,959	0,956
38	-	-	-	0,986	0,990	0,984	0,983	0,982	0,980
73	-	-	-	0,993	0,996	0,995	0,994	0,994	0,993

На рис.3 представлены зависимости значений суммарного коэффициента захвата η_{Σ} для частиц железорудной пыли исследуемых диаметров для различных диаметров капель воды.

Выводы.

1. Эффективность пылеподавления пылевого облака каплями орошаемой воды определяется установленным выражением и нелинейно зависит от объёма пылевого облака, количества орошаемой жидкости, скорости движения капель жидкости и твёрдых частиц, диаметра капель, высоты орошаемого облака, а также суммарного коэффициента захвата пылинок каплями жидкости.

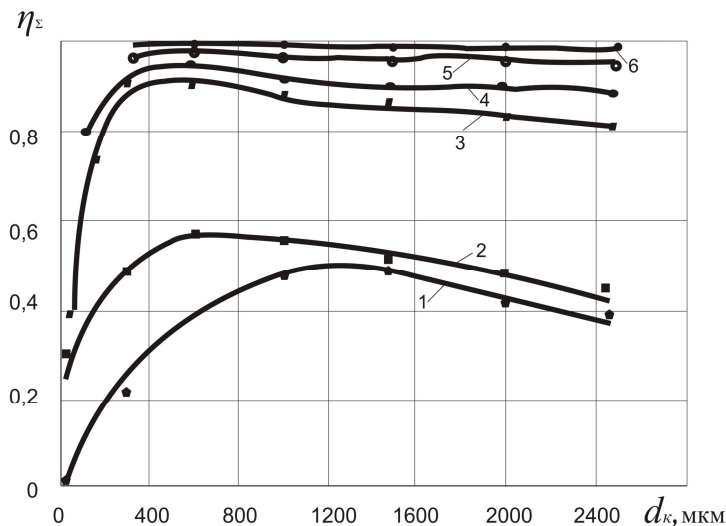


Рис. 3. Зависимость суммарного коэффициента захвата частиц железорудной пыли от их диаметра (1 - 1 мкм; 2 - 3 мкм; 3 - 7 мкм; 4 - 13 мкм; 5 - 23 мкм; 6 - 38;73 мкм) для исследуемых капель воды.

2. Суммарный коэффициент захвата пылевых частиц каплями воды зависит от диаметра капель и пылевых частиц, скорости их движения, плотности частиц пыли и вязкости среды. Рассчитаны его значения для частиц железорудной пыли различных фракций и диаметров водяных капель. Установлено, что значение суммарного коэффициента захвата для тонкодисперсной железорудной пыли имеет максимальное значение при диаметре капель воды 1 - 1,5мм и равен 0,488. Для грубодисперсной железорудной пыли коэффициент захвата при этих диаметрах капель воды изменяется от 0,815 до 0,996. Таким образом, подтверждается то положение, что чем больше диаметр витающей пыли, тем выше коэффициент захвата её каплями орошаемой жидкости.

Список литературы

1. Берлянд М. Е. Прогноз регулирования загрязнения атмосферы. –Л.: Гидрометеиздат, 1985, - 272с.
2. Способ борьбы с загрязнением атмосферы карьеров продуктами взрывов / П.В. Бересневич, В.Г. Наливайко, В.В. Ежов и др. // Безопасность труда в промышленности. – 1988. № 5, - С. – 44 – 46.
3. Наливайко В.Г. Расчёт эффективности пылеподавления мелкодисперсным дождеванием после массовых взрывов в карьерах // Борьба с опасными и вредными производственными факторами на горнорудных предприятиях: Отр. темат. сб. / М – во метал. СССР. Ин – т ВНИИБТГ. –М.: Недра, 1991. – С. 62-64.
4. Проблемы экологии массовых взрывов в карьерах / [Ефремов Э.И., Бересневич П. В., Петренко В. Д. и др.]; под ред. Э. И. Ефремова. – Днепропетровск : СІЧ, 1996. – 178с.
5. Белоусов В.В. Теоретические основы процессов газоочистки / Белоусов В.В. –М.: Металлургия, 1988.–256с.
6. Фукс Н. А. Механика аэрозолей / Фукс Н. А. –М.: Изд-во АН СССР, 1955. -351с.
7. Грин Х. Аэрозоли – пыли, дымы и туманы / Грин Х., Лейн В. Пер. с англ. Под ред. д-ра хим. наук Н.А. Фукса. Изд. 2-е, стереотип. –Л.: Из-во «Химия», 1972.–427с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Голінком В.І.
Надійшла до редакції 30.07.2012*