

### Список литературы

1. Горнорудное дело Украины в сети Интернет: справочник / О. Е. Хоменко, М. Н. Кононенко, А. Б. Владыко, Д. В. Мальцев. – Д.: Национальный горный университет, 2011. – 288 с. – На русском языке.
2. Покорители недр таврии. Посвящается добыче 100-миллионной тонне руды! / [под коорд. В. В. Фортунина]. – Запорожье: Цель, 2003. – 156 с.
3. Поздняков З. Г. Справочник по промышленным взрывчатым веществам и средствам взрывания / З. Г. Поздняков, Б. Д. Росси. – [2-е изд.]. – М.: Недра, 1977. – 253 с.
4. Паушева З.П. Практикум по цитологии растений. - М.: Агропромиздат. 1988. – 255 с.
5. Горовая А.И., Бобырь П.Ф., Скворцова Т.В., Дигурко В.М., Климкина И.И. Методологические аспекты оценки мутагенного фона и генетического риска для человека и биоты от действия мутагенных экологических факторов // Цитология и генетика. — 1996. — Т.30, №6, С.78-86.
6. МР 2.2.12 – 141 – 2007 Обстеження та районування території за ступенем впливу антропогенних чинників на стан об'єктів довкілля з використанням цитогенетичних методів / [С.А. Риженко, А.І. Горова, Т.В. Скворцова та ін.] – К.: Головне базове видавництво МОЗ України ДП "Центр інформаційних технологій", 2007 – 35 с.

*Рекомендовано к публикации д.б.н. Горовой А.И.  
Поступила в редакцию 18.04.2013*

УДК 622. 807

© А.А. Юрченко

## **ОБОСНОВАНИЕ СТЕПЕНИ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ВОДЫ ПРИ ОРОШЕНИИ ОБЛАКА ЖЕЛЕЗОРУДНОЙ ПЫЛИ ПОСЛЕ МАССОВЫХ ВЗРЫВОВ В КАРЬЕРАХ**

Наведені теоретичні основи методики розрахунку швидкості осідання аерозольних часток із пилогазової хмари при масовому вибухові в кар'єрі. Надані результати розрахунку швидкості осідання залізорудного пилу та капель води з розмірами часток як в області дії закону Стокса, так і за її межами. Визначено необхідний діаметр капель води, при якому досягається ефективне пригнічення хмари залізорудного пилу при її зрошуванні.

Приведены теоретические основы методики расчёта скорости осаждения аэрозольных частиц из пылегазового облака при массовом взрыве в карьере. Даны результаты расчёта скорости осаждения железорудной пыли и капель воды с размерами частиц как в области действия закона Стокса, так и вне её пределов. Установлено необходимый диаметр капель воды, при котором достигается эффективное подавление облака железорудной пыли при его орошении.

The theoretical basis of methods for calculating the rate of floating of aerosol particles of dust and gas clouds at a mass explosion in open-pit s given. The results of calculating the rate of floating of iron ore dust and water droplets with a particle size both according to Stokes law and outside its limits are represntal. The reguired desired diameter of water drops, at which the efficient suppression of the iron ore dust clouds during its irrigation is established.

**Вступление.** При массовом взрыве в карьере в атмосфере образуется пылегазовое облако, состоящее из смеси пыли и взрывных газов. Высота

подъёма облака зависит от мощности взрыва и может достигать 1,5 км [1]. Интенсивность образования пыли зависит от удельного расхода ВВ, изменяется в широких пределах и для условий Кривбасса составляет от 10 до 150 кг/м<sup>3</sup>. Концентрация пыли в облаке при этом составляет до 4000 мг/м<sup>3</sup>. По дисперсному составу частицы с диаметром до 1,4 мкм составляют около 11 %. На долю частиц с диаметром 1,4-4 мкм приходится до 12 %, с диаметром 4–15 мкм – до 27 %. Крупнодисперсная пыль с диаметрами частиц от 15 до 100 мкм представлена до 50 % от общей концентрации пыли [2]. Химический состав пыли зависит от вида взрывааемого горного массива.

**Постановка задачи.** При решении вопросов борьбы с пылегазовым облаком путём его орошения с целью снижения загрязнения атмосферы и прилегающих территорий необходимо установить требуемую степень диспергирования воды, при которой капли воды будут оседать быстрее пылевых частиц и тем самым обеспечивать “прочёсывание” ими пылевого облака. В этой работе рассматривается расчёт скорости осаждения аэрозольных частиц железорудной пыли и капель воды в гравитационном поле без учёта ветровой нагрузки, то есть в безветренную погоду.

**Изложение материала исследований.** В пылегазовом облаке сразу после взрыва в результате воздействия на пылевые частицы динамического фактора выброса из очага взрыва продуктов детонации и термического фактора из-за их высокой температуры пыль движется вверх. Причём высота подъёма частиц зависит также от их диаметра и плотности. При уравнивании сил, вызывающих движение частицы вверх, и сил сопротивления движению пылевая частица останавливается. И затем частица начинает движение вниз под действием силы тяжести  $F_g = mg$ , где  $m$  – масса частицы, кг;  $g$  – ускорение земной тяжести, м/с<sup>2</sup>. Противодействует движению частицы вниз выталкивающая сила Архимеда  $F_A = \rho_0 Vg$ , где  $\rho_0$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  – объём частицы, м<sup>3</sup>, а так же сила трения среды, которая при ламинарном режиме движения среды пропорциональна скорости движения частицы (Рис.1). Сила трения среды может быть выражена как  $F_{mp} = K\vartheta$ , где  $K$  – коэффициент сопротивления для области течения, Нс/м,  $\vartheta$  – скорость осаждения пылевой частицы, м/с [3].

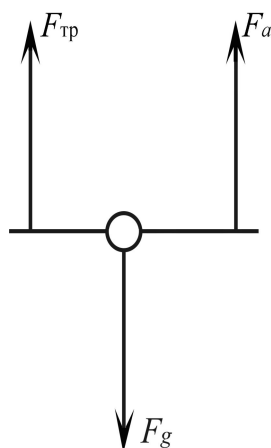


Рис.1. Силы, действующие на частицу при её осаждении

Для определения коэффициента сопротивления Стокс решил совместно уравнение движения Навье – Стокса и сплошности:

$$\frac{Du}{dt} = F - \frac{1}{\rho} \text{grad}P + \frac{\mu}{\rho} \bar{V}^2 \vartheta; \quad (1)$$

$$diV\vartheta = 0. \quad (2)$$

В результате совместного решения уравнений (1) и (2) он получил значение коэффициента сопротивления:

$$K = 3\pi\mu d,$$

где  $\mu$  - динамическая вязкость воздуха, Па с;  $d$  – диаметр пылевой частицы, м.

При решении уравнений были приняты допущения:

- сфера обтекается безграничным однородным потоком вязкой жидкости;
- обтекание медленное, стационарное, поэтому инерционными членами в уравнении можно пренебречь и учесть только силы давления и трения;
- объёмные силы отсутствуют.

Вначале пылевая частица движется ускорено, а затем сила трения среды  $F_{mp}$  уравнивает силу седиментации  $F_g - F_A$ :

$$F_{mp} = F_g - F_A. \quad (3)$$

После подстановки значений сил выражение (3) примет вид:

$$3\pi\mu d\vartheta = mg - \rho_0 Vg$$

Выразим массу и объём частицы как  $m = \rho V$ , а  $V = \frac{\pi d^3}{6}$ , то тогда выражение (3) примет вид:

$$3\pi\mu d\vartheta = \frac{\rho g \pi d^3}{6} - \frac{\rho_0 g \pi d^3}{6}.$$

Откуда после преобразований и сокращений получаем:

$$\vartheta = \frac{g(\rho - \rho_0)d^2}{18\mu}.$$

Плотностью воздуха  $\rho_0$  по сравнению с плотностью пылевых частиц можно пренебречь. В этом случае скорость осаждения частиц пыли определится по выражению:

$$\vartheta = \frac{g\rho d^2}{18\mu}. \quad (4)$$

Выражение (4) является формулой Стокса для определения скорости осаждения пылевых частиц в воздухе под действием сил гравитации [4, 5]. Однако ввиду принятых допущений область её применения ограничивается как по числу Рейнольдса, так и по размеру частиц. Значительные отклонения от формулы Стокса возникают в том случае, когда диаметр частиц соизмерим с длиной свободного пробега молекул газа. Хорошее совпадение формула даёт при числах Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{\rho_0 \vartheta d}{\mu} < 1 \quad (5)$$

С ростом числа  $\text{Re}$  на поверхности частицы возникают проскальзывания газа, то есть свойства газа начинают отличаться от свойств сплошной среды. В

кормовой области за частицей возникают вихревые зоны. Пограничный слой на поверхности частицы турбулизируется. При  $Re > 10^2$  образуются так называемые дорожки Кармана, состоящие из оторвавшихся вихрей. Сопротивление трения заметно возрастает. Величина инерционных членов уравнения Навье – Стокса в области  $Re > 10^4$  становится соизмеримой с вязкостными. В этом случае сила сопротивления пропорциональна квадрату скорости и определяется по выражению

$$F_c = \xi 0,5 \rho_0 g^2 \pi r^2,$$

где  $\xi = f(Re)$  – коэффициент сопротивления частицы, определяемый в общем случае по экспериментальным данным и зависящий от режима обтекания;  $r$  – радиус пылевой частицы, м.

Весь диапазон значений  $Re$  можно разделить на несколько областей, в пределах которых зависимость  $\xi = f(Re)$  можно аппроксимировать простыми формулами.

Так, в области действия закона Стокса для  $Re$  от 0,01 до 1  $\xi = \frac{24}{Re}$ .

В диапазоне  $Re = 10 \dots 10^3$  приемлема формула  $\xi = \frac{12}{\sqrt{Re}}$ .

В области развитого турбулентного течения, где  $Re > 10^4$ , коэффициент сопротивления практически не зависит от изменения числа  $Re$  и для сферы равен  $\xi = 0,45$ .

Для расчётов удобно пользоваться формулой вида  $\xi = \frac{A}{Re^n}$ , где коэффициенты  $A$  и  $n$  в зависимости от числа  $Re$  приведены в работе [3].

Скорость осаждения пылевой частицы можно определить и по методу Лященко. При этом скорость осаждения выражают через число Рейнольдса  $g = \frac{Re \mu}{\rho_0 d}$  и подставляют в уравнение осаждения частицы  $F_g = F_c$  или

$$\frac{1}{6} \pi d^3 (\rho - \rho_0) g = \frac{1}{2} \xi \rho_0 \frac{Re^2 \mu^2 \pi d^2}{\rho_0^2 d^2 4}.$$

Это уравнение сводится к виду

$$\xi Re^2 = \frac{4 d^3 \rho_0^2 (\rho - \rho_0) g}{3 \mu^2}, \quad (6)$$

где  $\frac{d^3 \rho_0^2 (\rho - \rho_0) g}{\mu^2} = Ar$  представляет собой число Архимеда.

В этом случае  $Ar = \frac{3}{4} \xi Re^2$ . Далее можно выразить число Рейнольдса для двух предельных случаев:

для стоксовской области  $Re < 1$ ;  $\xi = \frac{24}{Re}$ ;  $Re = \frac{Ar}{18}$ ;

для области  $Re > 10^4$ ;  $\xi = 0,45$ :  $Re = \frac{\sqrt{Ar}}{0,6}$ .

В целом для всего диапазона чисел Рейнольдса достаточную для ориентировочных расчётов точность даёт приближённая формула Годеса:

$$Re = \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}}. \quad (7)$$

В результате вышеизложенного расчёт скорости осаждения пылевых частиц в гравитационном поле осуществляют в следующем порядке:

- 1) рассчитывают скорость осаждения по формуле Стокса (4);
- 2) проверяют полученную скорость на число Рейнольдса по выражению (5);

3) если  $Re > 1$ , то формулу Стокса применять нельзя, так как получен ошибочный результат;

4) определяют число Архимеда по выражению (6);

5) по известному числу Архимеда определяют число Рейнольдса по формуле Годеса (7);

6) определяют скорость осаждения частицы через число Рейнольдса по выражению  $\vartheta = \frac{Re \mu}{\rho_0 d}$ .

Для оценки загрязнения прилегающих к карьеру территорий необходимо знать скорость осаждения пылевых частиц в гравитационном поле. Кроме этого, при решении вопросов пылеподавления с помощью орошения облака важно иметь данные о скорости осаждения капель воды. В табл.1 представлены результаты расчётов скорости осаждения пылевых частиц и капель воды различных диаметров. На рис.2 в графическом виде представлены зависимости скорости осаждения частиц железорудной пыли и капель воды от их диаметров в стоксовской и надстоксовской областях. При этом скорость оседания частиц железорудной пыли находится в диапазоне от 0,00012 до 0,995 м/с.

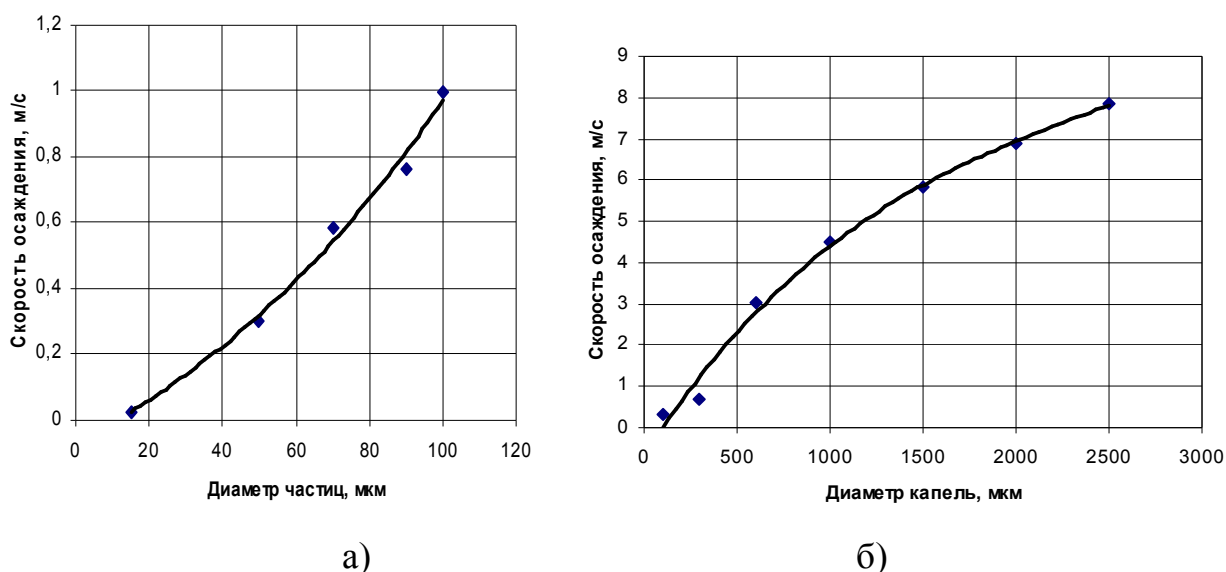


Рис. 2. Скорость осаждения аэрозольных частиц различного диаметра:  
а) железорудной пыли; б) капель воды

Таблица 1

Скорость осаждения железорудной пыли и капель воды  
в гравитационном поле

Вид аэрозольных частиц	Диаметр частиц, м	Скорость осаждения частиц, м/с	Число Рейнольдса
Железорудная пыль, $\rho = 4000 \text{ кг/м}^3$	$1 \cdot 10^{-2}$	0,00012	$0,0008 \cdot 10^{-2}$
	$2 \cdot 10^{-2}$	0,00048	0,00011
	$3 \cdot 10^{-6}$	0,00108	0,00021
	$4 \cdot 10^{-6}$	0,00191	0,00050
	$5 \cdot 10^{-6}$	0,00299	0,0010
	$6 \cdot 10^{-6}$	0,00431	0,0017
	$7 \cdot 10^{-6}$	0,00587	0,0027
	$8 \cdot 10^{-6}$	0,00766	0,0040
	$9 \cdot 10^{-6}$	0,00970	0,0056
	$10 \cdot 10^{-6}$	0,0120	0,0079
	$11 \cdot 10^{-6}$	0,0145	0,0110
	$12 \cdot 10^{-6}$	0,0172	0,0136
	$13 \cdot 10^{-6}$	0,0202	0,0173
	$14 \cdot 10^{-6}$	0,0235	0,0217
	$15 \cdot 10^{-6}$	0,0269	0,0265
	$20 \cdot 10^{-6}$	0,0479	0,0631
	$30 \cdot 10^{-6}$	0,1077	0,2129
	$40 \cdot 10^{-6}$	0,1915	0,5048
	$50 \cdot 10^{-6}$	0,2996	0,9871
	Капли воды, $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$	$51 \cdot 10^{-6}$	0,3110
$55 \cdot 10^{-6}$		0,3620	1,3130
$60 \cdot 10^{-6}$		0,4310	1,7050
$70 \cdot 10^{-6}$		0,5860	2,7050
$80 \cdot 10^{-6}$		0,7660	4,0400
$90 \cdot 10^{-6}$		0,9950	5,7500
$100 \cdot 10^{-6}$		0,9650	7,9015
$10 \cdot 10^{-6}$		0,003	0,002
$20 \cdot 10^{-6}$		0,012	0,016
$30 \cdot 10^{-6}$		0,027	0,053
$40 \cdot 10^{-6}$		0,048	0,126
$50 \cdot 10^{-6}$		0,075	0,247
$60 \cdot 10^{-6}$		0,108	0,426
$70 \cdot 10^{-6}$		0,147	0,676
$80 \cdot 10^{-6}$		0,192	1,009
$90 \cdot 10^{-6}$		0,244	1,450
$100 \cdot 10^{-6}$		0,300	1,940
$300 \cdot 10^{-6}$		0,677	29,730
$600 \cdot 10^{-6}$		3,04	120,270
$1000 \cdot 10^{-6}$		4,49	296,040
$1500 \cdot 10^{-6}$	5,83	576,710	
$2000 \cdot 10^{-6}$	6,91	910,940	
$2500 \cdot 10^{-6}$	7,83	1290,800	

Для повышения эффективности пылеподавления капли орошаемой жидкости должны иметь значительно больший диаметр и, соответственно, значительно больше скорость осаждения. При этом обеспечивается "прошивание" облака каплями орошаемой жидкости. Капли воды имеют скорость оседания, равную скорости оседания крупнодисперсной железорудной пыли, при диаметре 400 мкм. С учётом полученных результатов исследований коэффициента захвата аэрозольных частиц каплями воды при их орошении, которые приведены в работе [6], для эффективного подавления облака железорудной пыли диаметр капель воды должен быть 1000 – 1500 мкм. При этом скорость осаждения капель воды составляет 4,5 – 6,5 м/с, которая значительно выше скорости частиц пыли, в том числе и крупнодисперсной.

Такие диаметры капель имеет вода при самодиспергировании в процессе осаждения в атмосферном воздухе под действием сил гравитации [7].

**Выводы.** Проведенные теоретические исследования позволили установить:

1. Максимальный диаметр аэрозольных частиц, для расчёта скорости осаждения которых правомочно применить закон Стокса, для железорудной пыли составляет 50 мкм, а для капель воды – 80 мкм.

2. Рассчитаны скорости осаждения частиц железорудной пыли и капель воды с диаметрами вне стоксовской области по усовершенствованной методике.

3. Обоснованный диаметр капель воды, при котором обеспечивается наиболее эффективное пылеподавление при орошении облака железорудной пыли, составляет 1–1,5 мм, скорость осаждения которых в гравитационном поле составляет 4–6 м/с. Этим достигается превышение в несколько раз скорости осаждения даже крупнодисперсной железорудной пыли и обеспечивается "прошивание" облака пыли каплями воды.

#### Список литературы

1. Дриженко А. Ю., Козенко Г. В., Рыкус А.А. Открытая разработка железных руд Украины. Состояние и пути совершенствования. Полтава: "Полтавский литератор", 2009. 451с.
2. Тыщук В. Ю. Проблемы экологии при ведении открытых горных работ. // Материалы научно – практической конференции "Проблемы экологии - 97" (С. – Петербург, 12 – 14 ноября 1997 г.). – С. – Петербург: НИЦЭБ РАН, БГТУ, 1997. – С. 458.
3. Белоусов В.В. Теоретические основы процессов газоочистки. – М.: Металлургия, 1988. - 256с.
4. Грин Х., Лейн В. Аэрозоли – пыли, дымы и туманы. –М.: Изд-во "Химия", 1969. -427с.
5. Фукс Н. А. Механика аэрозолей. – М.: Изд-во АН СССР. -1955,-351с.
6. Юрченко А. А. Исследование коэффициента захвата аэрозольных частиц каплями воды при орошении. //Збірник наукових праць Національного гірничого університету № 39, Дніпропетровськ, 2012. –С. 187 – 194.
7. Берлянд М. Е. Прогноз регулирования загрязнения атмосферы. – Л.: Гидрометиздат, 1985, 272с.

*Рекомендовано до публікації д. т. н. Голіньком В. І.  
Надійшла до редакції 05.03.2013*