

7. Бурчаков А.С., Воробьев П.М., Малкин А.С. Проектирование и комплексная оптимизация параметров шахт. — М.: «Недра», 1972.

8. Математико-статистический анализ на программируемых микрокалькуляторах: Справ. пособие // Под ред. В.В. Шуракова. — М.: Финансы и статистика, 1991. — 176 с.

© Борцевский С.В., 2005

УДК 622.235:622.281.4

Докт. физ.-мат. наук ГРЕЧИХИН Л.И. (Минский государственный высший авиационный колледж), докт. техн. наук ШЕВЦОВ Н.Р., инж. ХОМЕНЧУК О.В. (ДонНТУ)

## ДИНАМИКА РАЗЛЕТА ЧАСТИЦ РАЗНЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ВЗРЫВНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ РАБОТ

Применение взрывных технологий в строительстве представляет большой интерес. Это обусловлено тем, что такая технология является безлюдной, а цементный раствор, нанесенный на обрабатываемую поверхность взрывом, обладает лучшей схватываемостью и механическими свойствами получаемой бетонной крепи в шахтном строительстве [1-4] требуемого качества.

Эти положительные качества обусловлены тремя причинами:

1. Измельчением твердых частиц песка ( $\text{SiO}_2$ ), глинозема ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и красного железняка ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) в цементно-песчаном растворе и превращение их в жидкое состояние [2].

2. Увеличением энергии связи между твердыми частицами с помощью поверхностно активного вещества (ПАВ).

3. Укладка бетона производится при более высоком гидростатическом давлении.

Исследования взрывной технологии набрызгбетона, проведенные в Донецком национальном техническом университете на кафедре «Строительство шахт и подземных сооружений» [1-4], убедительно подтвердили целесообразность применения взрывной технологии, так как такой способ не требует применения сложных механизмов, прост в исполнении, технологичен и надежен в обращении. Однако дальнейшее совершенствование взрывной технологии требует детального теоретического описания расширяющихся продуктов взрыва в оболочке веществ с различными физическими характеристиками.

В работе [4] теоретически описан разлет вещества с учетом характера движения твердых частиц в окружающей атмосфере. Однако не учтен механизм измельчения твердых частиц.

Ниже рассмотрим подробнее первую из причин с обоснованием физического механизма разлета вещества.

В первой работе по организации взрывной технологии в строительстве [1] было обнаружено существенное измельчение порошковых материалов при взрывном распылении. В работах [1,3] на примере распыления порошка из гидрокарбоната натрия было показано, что во фракционном составе после взрывного распыления максимум фракции 0,7–0,36 мм сместился в область 0,25–0,11 мм. В работе [4] для обоснования экспериментальных данных по разлету оболочки цементно-песчаного раствора был введен эффективный размер твердых частиц радиусом 0,193 мм, тогда как в исходном растворе твердые частицы имели радиус более 0,5 мм [3].

Следовательно, после взрыва ВВ при прохождении ударной волны по окружающей оболочке из жидких и порошковых материалов происходит дробление крупных твердых частиц на более мелкие. Вследствие этого энергия, выделившаяся при взрыве ВВ, частично тратится на дробление крупных твердых частиц внутри оболочки еще и на ее распыление.

При дроблении твердых частиц внутри оболочки происходит возрастание свободной энергии вследствие увеличения внешней поверхности образующихся более мелких частиц. Затраты энергии в этом случае определяются по формуле:

$$\Delta Q = \sigma \Delta S, \quad (1)$$

где  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения и  $\Delta S$  — изменение свободной энергии вследствие изменения свободной поверхности вследствие дробления частиц.

Молекулы  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  обладают встроенными дипольными электрическими моментами соответственно: 6,19; 6,06 и 4,53 D (Дебая) [5,6]. Обладая такими большими дипольными электрическими моментами, эти молекулы в конденсированном состоянии представляют собой ионные кристаллы. Ионные кристаллы обладают простой кубической структурой. В таких структурах кластерные образования первого координационного слоя содержат 7 молекул (четыре в горизонтальной плоскости и две в вертикальной плоскости вокруг рассматриваемой молекулы). Это основной кластер и имеет размер  $6 \cdot r$  во всех трех направлениях. Максимальный диаметр молекулы  $\text{SiO}_2$  составляет 3,72 Å, а минимальный 3,02 Å. Соответственно для  $\text{Al}_2\text{O}_3$  имеем 8,28 и 3,63 Å, а для  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  — 7,99 и 3,43 Å. Молекула  $\text{SiO}_2$  почти сферическая, а молекулы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  — вытянутые вдоль направления электрических моментов радикалов AlO и FeO.

Размеры кластеров веществ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  вдоль направления электрических моментов соответственно равны 1,12; 2,454 и 2,398 нм, а в поперечном направлении — 1,044; 1,090 и 1,029 нм. В соответствии с формулой (1) при полном разрыве на отдельные кластерные образования затрачивается энергия на один кластер соответственно 5,2; 6,1 и 2,1 эВ. Это значительно больше энергии связи кластеров между собой. Поэтому под давлением  $1,12 \cdot 10^9$  Па произойдет полное превращение в жидкое состояние всех твердых частиц.

В [6] показано, что взаимодействие наночастиц в кластерной решеточной структуре определяется в основном диполь-дипольным взаимодействием. Результаты расчетов межкластерных бинарных связей в горизонтальном ( $E_{\parallel}$ ) и вертикальном ( $E_{\perp}$ ) направлениях приведены в табл. 1.

**Табл. 1.** Энергия бинарного взаимодействия и результирующая энергия связи частиц в кластере (эВ), размеры кластера в Å число кластеров в единице объема и полная работа разделения кластеров ( $A$ ) в объеме радиуса 0,5 м в Дж

Вещество	Параметры							
	$E_{\parallel}$	$E_{\perp}$	$E_{\text{рез.}}$	a	b	c	$n_{\text{кл.}}$	A
$\text{SiO}_2$	0,100	0,200	0,804	11,76	9,36	9,07	$1,00 \cdot 10^{27}$	$6,75 \cdot 10^7$
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0,200	0,200	0,798	10,90	10,90	24,54	$3,43 \cdot 10^{26}$	$2,30 \cdot 10^7$
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,158	0,158	0,646	10,29	10,29	23,98	$3,72 \cdot 10^{26}$	$2,02 \cdot 10^7$

Из теоретических оценок получается, что стекло начинает плавиться с температуры  $887^{\circ}\text{C}$  и заканчивается при температуре  $2050^{\circ}\text{C}$ . Эксперимент для кварца дает  $1728^{\circ}\text{C}$ , т.е. близкое значение к средне эффективному. Для глинозема и красного железняка энергии бинарной связи в горизонтальном и вертикальном направлениях одинаковые. Поэтому для этих веществ температура плавления во всех направлениях по-

стоянная и соответственно равна 2050 и 1565<sup>0</sup>С. В жидком состоянии вещество состоит из отдельных кластеров и отдельных молекул в межкластерных объемах.

Чтобы полностью разрушить кластерную решеточную структуру, т.е. твердое состояние, в единице объема необходимо затратить работу:

$$A = E_{св.,кл.} \cdot n_{кл.} \quad (2)$$

где  $E_{св.,кл.}$  — результирующая энергия связи кластера в твердом состоянии и  $n_{кл.}$  — концентрация кластеров.

Результирующая энергия связи кластеров различных веществ приведена в табл. 1. Концентрация кластеров находится как отношение вида:

$$n_{кл.} = \frac{1}{abc}, \quad (3)$$

где  $a$ ,  $b$  и  $c$  — соответственно ширина, длина и высота кластера. Значения этих величин для ряда веществ приведены в табл.1. Конкретные расчеты затраченной работы для объема радиуса 0,5 м по (2) также приведены в табл. 1.

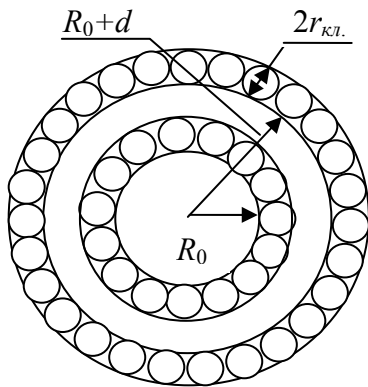


Рис.1. Схема расширения шарового слоя

По данным работы [3] энергия, выделяемая при взрыве ВВ, составляет  $2,68 \cdot 10^6$  Дж. Получается, что этой энергии не достаточно, чтобы раздробить твердые частицы песка до размеров основных кластеров. При таком энерговыделении должны образовываться частицы более крупные по сравнению с основным кластером.

Если в результате воздействия ударной волны образуются частицы размером  $d$ , то вблизи конечного радиуса  $R_0=0,5$  м возникает расширение объема с ростом радиуса на величину размера образующейся частицы. Расширение происходит почти мгновенно и поэтому такой процесс расширения является адиабатическим. Шаровой слой радиуса  $R_0$  толщиной равной кластерному размеру увеличивается до размера  $R_0+d$ , как

это показано на рис. 1. При этом давление уменьшится на величину  $\Delta P$ . Для этого случая запишем уравнение адиабаты:

$$P_0 \left( 4\pi R_0^2 2r_{кл.} \right)^\gamma = (P_0 - \Delta P) \left[ 4\pi (R_0 + d)^2 2r_{кл.} \right]^\gamma. \quad (4)$$

где  $\gamma=1,67$  — постоянная адиабаты для многоатомных молекул.

Из (4) находим  $\Delta P$ :

$$\Delta P = \frac{P_0 \left[ \left( 1 + \frac{2d}{R_0} \right)^\gamma - 1 \right]}{\left( 1 + \frac{2d}{R_0} \right)^\gamma} \approx P_0 \frac{2\gamma d}{R_0}. \quad (5)$$

При заданной величине поверхностного натяжения ( $\sigma$ ) распыляемого вещества размер частиц вследствие воздействия ударной волны определяется по формуле [3]:

$$d = \frac{4\sigma}{\Delta P}. \quad (6)$$

С учетом (5) имеем:

$$d = \sqrt{\frac{2\sigma R_0}{\gamma P_0}}. \quad (7)$$

При давлении, которое возникает за ударной волной на границе раздела распыляемого вещества и окружающего воздуха  $1,12 \cdot 10^9$  Па, твердое вещество пребывает в жидком состоянии. Для жидкости коэффициент поверхностного натяжения следует определять как работу, которую необходимо затратить, чтобы отдельную молекулу вывести за пределы ее связи с основным кластером. В зависимости от расположения молекулы на поверхности раздела двух сред относительно основного кластера энергия связи будет разной (см. табл. 1). Среднеэффективная энергия связи равна:

$$E_{св.,эфф.} = \frac{4}{6} E_{||} + \frac{2}{6} E_{\perp}, \quad (8)$$

где  $4/6$  и  $2/6$  — вероятности пребывания молекулы при заданном расположении на поверхности раздела.

Для водно-песчаной смеси разрыв вещества происходит по кристаллической воде, для которой энергия связи молекул внутри жидкости составляет  $0,307$  эВ [7], а для обычной воды — это  $0,476$  эВ [7]. Эффективный коэффициент поверхностного натяжения составит:

$$\sigma_{эфф.} = \frac{E_{св.,эфф.}}{4r_{кл.}^2}. \quad (9)$$

Вычисленные таким образом коэффициенты поверхностного натяжения приведены в табл. 2.

**Табл. 2.** Значения коэффициента поверхностного натяжения в Дж/м<sup>2</sup>, размеров разлетающихся частиц в мкм, начальных скоростей движения в м/с и отношения масс для различных распыляемых веществ

Вещество	Параметры			
	$\sigma$	$d$	$v$	$m_2/m_1$
SiO <sub>2</sub>	0,137	905,7	613	1/1
H <sub>2</sub> O	0,075	670,1	536	1,35/1,32
SiO <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O	0,048	536,1	280	1,68/1,67

Результаты вычислений размеров частиц по (7), возникающих в первоначальный момент разрыва вещества приведены также в табл. 2.

На расстоянии, равном размеру частицы  $d$ , она испытывает силу давления  $\Delta P/d^2$  и поэтому движется ускоренно. Вследствие этого частица приобретает кинетическую энергию. Скорость движения в момент полного разрыва вещества равна:

$$v = \sqrt{\frac{2E_q}{m_q}}, \quad (10)$$

где  $E_q$  — кинетическая энергия частицы в момент ее формирования и  $m_q$  — ее масса.

При равенстве начальных скоростей для разных распыляемых веществ имеем:

$$\sqrt{\frac{2E_{q,1}}{m_{q,1}}} = \sqrt{\frac{2E_{q,2}}{m_{q,2}}}. \quad (11)$$

В свою очередь:

$$E = P_0 dV ,$$

где  $dV=4\pi R_0^2 d$ .

Тогда

$$\frac{m_{ч,2}}{m_{ч,1}} = \frac{d_2}{d_1} . \quad (12)$$

Полученное отношение масс приведено в табл. 2. При одинаковых условиях разлета разных веществ отношение их масс равно отношению их размеров. Результаты теоретических оценок отношения масс приведены в табл. 2.

Экспериментально значение отношения масс для различных веществ при одинаковых условиях разлета подтверждено в виде безразмерного коэффициента  $\psi$  [8,9].

В результате были получены отношения масс, которые приведены в табл. 2. под чертой. Прекрасное совпадение экспериментальных данных с теоретическим расчетом свидетельствует о правильно разработанной физико-математической модели разлета вещества применительно к взрывной технологии набрызгбетона.

### Библиографический список

1. **Шевцов Н.Р., Михайлов А.Б.** Исследование процесса измельчения порошковых материалов при взрывном распылении. // Безопасность взрывных работ в угольных шахтах: Сб. науч. Тр. МакНИИ. — Макеевка: МакНИИ, 1977. — С.5–9.
2. **Шевцов Н.Р., Хоменчук О.В.** Промышленные испытания технологии возведения набрызгбетонной крепи взрывным способом. // Наукові праці ДонНТУ: серія гірничо-геологічна. — Донецьк: ДонНТУ, 2002. — № 54. — С. 94–99.
3. **Гречихин Л.И., Шевцов Н.Р., Хоменчук О.В.** Основы теории распыления оболочек из жидких и порошковых материалов центральным взрывом. // Проблемы гірського тиску. Випуск 9 / Під заг. ред. О.А. Мінаєва. — Донецьк: ДонНТУ, 2003. — С. 236–256.
4. **Гречихин Л.И., Шевцов Н.Р., Хоменчук О.В.** Динамика распыления оболочек из жидких и порошковых материалов // Наукові праці ДонНТУ: серія гірничо-геологічна. 2004. — № 72. — С. 41–46.
5. **Радциг А.А., Смирнов Б.М.** Справочник по атомной и молекулярной физике. — М.: Атомиздат, 1980. — 240 с.
6. **Гречихин Л.И.** Физика наночастиц и нанотехнологий. — Мн.: УП «Технопринт», 2004. — 397 с.
7. **Гречихин Л.И., Кузьмич В.В.** Кавитационный тепловой насос. // Материалы 4-й Международной научно-технической конференции «Ресурсосберегающие экотехнологии: возобновление и экономия энергии, сырья и материалов». Гродно: ГрГУ, 2001. — 236 с. — Ч. 1. С. 99–107.
8. **Шевцов Н.Р., Хоменчук О.В.** Взрывной способ набрызгбетонирования // Сборник научных трудов НГУ № 17, том 2. — Днепропетровск: РИК НГУ, 2003. — С.43–49.
9. **Шевцов Н.Р., Хоменчук О.В., Михайлов А.Б.** Динамика взрывного распыления материалов с различными физическими характеристиками // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: Сб. науч. Тр. МакНИИ. — Макеевка-Донбасс, 2003. — С.134–139.

© Гречихин Л.И., Шевцов Н.Р., Хоменчук О.В., 2005