

#### Список литературы:

1. Пречистенский С.А. Центрифугирование аэрозолей в ЦРП. – М.: Атомиздат, 1960. –144 с.
2. Кучерук В.В. Очистка вентиляционного воздуха от пыли М.: «Машиностроение», 1963. –144 с.
3. Василевский М.В. Обеспыливание газов инерционными аппаратами. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 248 с.
4. Филиппов Г.А., Поваров О.А. Сепарация влаги в турбинах АЭС. М.: Энергия, 1980, 320 с.
5. А.С. (СССР) 1009495 Ротор центробежного сепаратора для очистки газа / Василевский М.В., Анисимов Ж.А., Виклов В.Ю., Малкин А.И. // Б.И. 1983, № 13.
6. Фортье А. Механика суспензий. Пер. с франц. Мир, 1971, 264 с. Сукомел А.С., Величко В.И., Абросимов Ю.Т., Гуцев Д.Ф. Затухание турбулентности на входном

УДК 621.928.93

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВЯЗНОСТИ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Василевский М.В., к.т.н., Разва А.С., к.т.н., Гребеньков Я.А.

Томский политехнический университет, г. Томск

E-mail: [razva@mail.ru](mailto:razva@mail.ru)

Существующие методы определения структурно-механических характеристик порошкообразных материалов направлены на выявление их технологических свойств в конкретных производствах продукции. Поведение порошка в технологических процессах определяется его способностью оказывать сопротивление изменению объема, формы, нарушению целостности [1]. Эксплуатационная надежность систем пыле- и золоулавливания зависит от аутогезионных свойств (сцепления частиц друг с другом, связность). В технике газоочистки аутогезионным свойствам присвоен термин «слипаемость». С целью прогнозирования поведения порошка изучаются его прочностные, реологические характеристики. Реальные порошки характеризуются неоднородностью, наличием агломератов, различаются плотностью упаковки частиц. С уменьшением размера частиц пористость увеличивается. При увеличении размеров частиц в 10 раз при одних и тех же условиях формирования материала относительная плотность возрастает в 2–3 раза [2]. Одним из показателей связности является прочность на разрыв слоя  $T$ . В зависимости от этой прочности дисперсные материалы разделены на группы по слипаемости. По Е.И. Андрианову, пыль неслипающаяся, если прочность разрыва менее 60 Па; слабо слипающаяся  $60 < T < 300$  Па; среднеслипающаяся, если  $300 < T < 600$  Па; сильнослипающаяся – прочность разрыва более

600 Па [3]. Другим показателем является сцепление частиц при сдвиге. Предельное сопротивление сыпучего материала сдвигу  $\tau$  пропорционально нормальному давлению на плоскость скольжения  $\sigma_n$ . Нормальное давление определяется внешней нагрузкой или массой частиц. Частицы, между которыми проходит плоскость скольжения при сдвиге, испытывают еще и взаимное притяжение под действием сил аутогезии. Эта сила численно равна прочности на разрыв  $T$ . При нулевом значении нормального давления в плоскости скольжения продолжает действовать сжимающее напряжение, численно равное прочности на разрыв  $T$ . Это напряжение в отсутствие нормального давления создает сопротивление сдвигу, называемом сцеплением  $C$ . Закон Кулона для связных материалов имеет вид  $\tau=C+\sigma_n \cdot \operatorname{tg}\varphi_\tau$ , где  $\varphi_\tau$  – угол внутреннего трения для сыпучего материала,  $C=T \operatorname{tg}\varphi_\tau$ . Однако для тонкодисперсных материалов применимо другое выражение  $(\tau/C)^n = \sigma_n/T + 1$ , где  $n$ -индекс сдвига  $n = 1 \div 2$ . Кривые сдвиговых испытаний снимают на приборе Дженике [1]. Прибор дает неоднозначные показания, которые зависят от степени предварительного уплотнения порошка в приборе, равномерности укладки и уплотнения в режиме сдвига. Работа с прибором требует высокой квалификации оператора.

С увеличением аутогезионной способности и внутреннего трения порошкообразный материал приобретает прочность, достаточную для

Таблица 1. Показатели, характеризующие связность порошка M1

	M1			
$m_n(z)$	0,9			
	P1	P2	P3	P4
$T (z/cm^2)$	0,21	0,63	1,15	4,56
$m_y(z)$	1,3	1,8	2	2,2
$P_\tau(z)$	6,5	63	102	163
$P$ (кПа)	1	10	20	50
$T (z/cm^2)$	0,21	0,63	1,15	4,56
$m_y(z)$	1,3	1,8	2	2,2
$P_\tau(z)$	6,5	63	102	163

того, чтобы противостоять разрушению под действием собственной тяжести. Чем выше прочность и чем меньше плотность порошка, тем большей может быть высота образца с вертикальным откосом. Для определения высоты вертикального откоса порошка используют открытый сверху ящик, одна из боковых стенок которого откидывается на шарнирах. В ящик загружают послойно материал до определенной высоты, разравнивают поверхность каждого слоя и медленно опускают боковую стенку. Если боковая грань образца не обрушивается, опыты

повторяют, увеличивая величину засыпки до тех пор, пока не произойдет ее обрушение. Высота вертикального откоса является комплексной характеристикой. Она отражает соотношение между аутогезионной способностью порошка, которая определяет прочность порошкового тела, его внутренним трением и плотностью, которые определяют напряженное состояние у открытой стенки [1]. Такой метод определения сцепления требует значительного количества материала.

Цель данной работы – анализ и сравнение показателей, характеризующих аутогезионные свойства частиц дисперсного материала.

Расклассифицированные материалы корунда и цемента просеивались через сито 1 мм, проходили стадии уплотнения, определения разрывной прочности, плотности, усилия выдавливания. В табл.1 приведены данные для порошка М1 (80% массы порошка содержит частицы не более 1мкм). В качестве датчика разрывной прочности слоя применялся прибор, в котором был применен метод разрыва слоя с использованием липкой смазки (вазелин). Поверхность, покрытую липкой смазкой, приводят в соприкосновение со слоем порошка и затем отрывают вместе с прилипшей к смазке частью слоя [1]. Диаметр диска – 9 мм. В качестве силоизмерительного устройства применялось уравновешенное коромысло, одно плечо которого соединено с диском, а к другому подвешен сосуд для воды, которая подавалась через дозатор с необходимой скоростью [1]. Разрывное напряжение смазки при контакте диска с твердой поверхностью без порошка составляло 3,1 кПа.

Масса цилиндра 15,31 г; диаметр цилиндра 1,5 см; высота цилиндра 1,2 см; уплотняющая нагрузка:  $P_1=1$  кПа,  $P_2=10$  кПа,  $P_3=20$  кПа,  $P_4=50$  кПа; насыпной вес материала, заполняющего объем цилиндра:  $m_{нМ1}=0,90$  г,  $m_{нМ2}=1,20$  г,  $m_{нМ5}=1,69$  г,  $m_{нцемент}=2,11$  г;  $T$ ,  $m_y$ ,  $P_\tau$  – разрывная прочность, вес объема уплотненного материала, усилие выдавливания материала из цилиндра ( $1 \text{ г/см}^2 \approx 100 \text{ Па}$ ).

При использовании метода липкой смазки необходимо учитывать, что после уплотнении слоя поверхность этого слоя может находиться в разрыхленном состоянии. Это объясняется тем, что при отъеме уплотнительного диска (плунжера) частицы на поверхности слоя находятся в контакте с поверхностью диска (торцевой плунжера) и поверхность подвергается растягивающим усилиям. Поэтому этот слой перед началом измерений необходимо удалить. Поскольку при подаче материала в форму происходит сегрегация частиц, слой материала представляет неоднородную структуру, причем на поверхности слоя адгезионные свойства слоя по сечению неодинаковы (присутствуют образовавшиеся агломераты при отъеме уплотняющей поверхности плунжера). Кроме то-

го, необходимо учитывать, что на поверхности слоя проявляются силы поверхностного напряжения (поверхностная энергия), которые также могут проявляться при формировании образца. Все эти факторы могут приводить к погрешностям и даже грубым ошибкам измерения величины  $T$ .

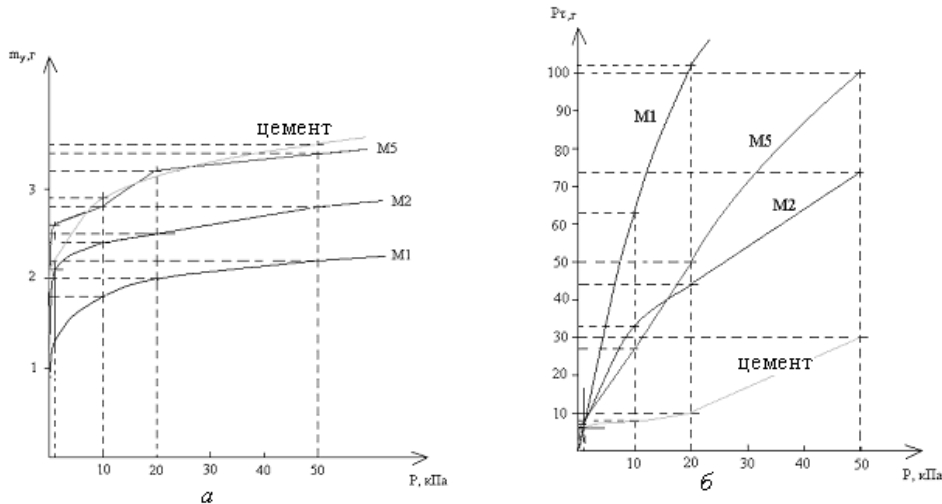


Рис.1: а – зависимость веса объемов порошков от уплотняющей нагрузки; б – зависимость силы выдавливания порошков от уплотняющей нагрузки.

Как видно из таблицы 1, наибольшее изменение претерпевает величина  $P_r$ , причем эта величина измеряется гораздо с меньшей погрешностью, чем  $T$ . При этом не требуется специальной аппаратуры. На рис. 1а и 1б показаны зависимости веса объемов порошков и выдавливающей силы от уплотняющей нагрузки.

В пределах изменения уплотнительной нагрузки 1÷20 кПа происходит быстрое увеличение плотности материала. Сыпучее тело после уплотнения находится в напряженном состоянии, которое определяется аутогезионными силами. Рост прочности осуществляется как за счет увеличения числа контактов, так и за счет увеличения поджима частиц друг к другу. При выталкивании материала из цилиндра нагрузка передается всем слоям тела, находящегося в объеме матрицы. Изменение выталкивающего напряжения по высоте цилиндра равно элементарной силе сопротивления, приходящейся на единицу боковой поверхности:

$$d\sigma\pi R^2 = -dh2\pi R\sigma_{бок}f_1; \quad \sigma_{бок} = n\sigma; \quad \sigma = P \exp\left(-\int_0^h 2f_1 n d\frac{h}{R}\right),$$

где  $\sigma$ ,  $\sigma_{бок}$  – нормальное и боковое давления,  $f_1$  – коэффициент внешнего трения,  $n$  – коэффициент бокового давления,  $h$  – переменная

высота,  $R$  – радиус цилиндра. В общем случае величины  $f_1$ ,  $n$  не постоянны.

Как следует из приведенных зависимостей, показателем связности может являться величина отношения изменения величины выталкивающей силы к изменению величины уплотнения.

#### Список литературы:

1. Андрианов Е.И. Методы определения структурно-механических характеристик порошкообразных материалов. М.: Metallurgia, 1982. 256 с.
2. Зимон А.Д., Андрианов Е.И. Аутогезия сыпучих материалов. М.: Metallurgia, 1978. 288 с.
3. Справочник по пыле- и золоулавливанию // Под ред. М.И. Биргер, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков и др. Под общей ред. А.А. Русанова – 2 изд. М.: Энергоатомиздат, 1983. 312 с.
4. Зенков Р.Л. Механика насыпных грузов. М.: Недра, 1964. 251 с.

УДК 533.6:931.928.3

## **МЕТОД ОЧИСТКИ ВОЗДУХА ОТ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ В УСТАНОВКАХ ПНЕВМОТРАНСПОРТА**

Василевский М.В., к.т.н., Разва А.С., к.т.н., Киреев А.В.

Томский политехнический университет

E-mail: [razva@mail.ru](mailto:razva@mail.ru)

Пневмотранспорт тонкодисперсных материалов используется почти во всех отраслях промышленности. В приемном узле транспортирующий поток освобождается от материала и направляется на доочистку. Чаще всего для окончательной очистки используют фильтры. Однако они не надежны: либо разрушаются, либо забиваются и создают большое противодействие в системе, нарушающее работу транспортной линии.

В июле 2002 г. нами было проведено обследование приемного узла цемента пневмотранспортной линии бетоно-смесительного узла завода ЖБИ-27 с целью определения аэродинамических характеристик, эффективности осаждения цемента и проектирования газоочистой установки (ГОУ) в случае возникновения такой необходимости. На заводах ЖБИ отработана схема устойчивой транспортировки и выделения цемента из потока, в которой часть потока в приемном узле проходит в бункер накопитель, в этом случае цемент не зависает в разгрузителе. Поэтому в приемном узле имелось два патрубка вывода отработанного воздуха: из верхней части разгрузителя  $d=70$  мм и из бункера накопителя  $d=120$  мм. Из этих патрубков воздух с неосевшей пылью выходил в атмосферу через рукава (на высотах 20...23 м).