

Висновки. Запропоновано спрощену математичну модель вібраційного гідроприводу пресування твердих побутових відходів з використанням генератора імпульсів тиску диференціальної дії, що дозволила отримати аналітичні залежності частоти та амплітуди від основних параметрів вказаного приводу, які можуть бути використані для виконання попередніх проектних розрахунків його параметрів.

Список літератури: 1. Постанова Кабінету Міністрів України від 4 березня 2004 року № 265 "Про затвердження Програми поводження з твердими побутовими відходами". 2. *Обертюх Р.Р., Іскович-Лотоцький Р.Д.* Генератори імпульсів тиску – основна ланка гідроімпульсного приводу // Вісник ВПІ. 1995. – № 1. – С. 42 – 47. 3. *Березюк О.В., Сторожук С.Б., Коц І.В.* Математичне моделювання вібраційного гідроприводу плити пресування твердих побутових відходів // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2006. – № 40. – С. 20 – 25.

Поступила в редколегію 11.09.08

УДК 666.91:621.351

В.И. ВИННИЧЕНКО, докт. техн. наук, **В.В. КОТЛЯРЕНКО**, аспірант,
А.В. БАБИНЦЕВ, аспірант, ХГТУСА

СКОРОСТЬ ВИТАНИЯ ЧАСТИЦ И КОЭФФИЦИЕНТ ЗАПАСА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ГАЗОВОГО ПОТОКА В УСТАНОВКЕ ДЛЯ ДЕГИДРАТАЦИИ ГИПСА

У статті проводиться огляд існуючих формул швидкості витання часточок матеріалу. Вказано найбільш доцільні для використання формули при дегідратації гіпсу в потоці теплоносія. Визначено коефіцієнт, який дозволяє розраховувати мінімально необхідну швидкість газового потоку для підйому і транспортування гіпсових часточок в установці для дегідратації

In article the review of existing formulas for definition of speed of sedimentation of particles of a material is spent. The most rational formulas for use are specified at dehydration of gypsum in a stream of the heat carrier. The factor is determined, allowing to calculate minimally necessary speed of a gas stream for transportations of gypsum particles in installation for dehydration

Исследователям пока еще не удалось разработать единой формулы для скорости витания частиц пыли. Сложность разработки такой формулы состо-

ит в том, что размеры частиц очень малы и на их движение влияют вместе с гравитационной силой еще и такие факторы, как броуновское движение, электростатические явления и форма частиц. Для определения скорости витания пылевых частиц могут применяться разные формулы в зависимости от величины частиц. Сложно также строго разграничить области применения той или иной формулы. Для некоторых размеров частиц разные формулы совпадают [1, 2].

Рассмотрим существующие подходы к теоретическому определению скорости витания и наиболее известные зависимости, с помощью которых можно определить скорость витания частиц материала в восходящем потоке теплоносителя в установке.

Как известно, условие витания частицы материала в восходящем потоке идентично условию равномерного осаждения частицы в неподвижной среде.

При движении частицы материала в неподвижной газовой среде под действием собственного веса уравнение движения частицы будет иметь вид:

$$Q_{\text{ч}} - N_{\text{А}} - O = \frac{Q_{\text{ч}}}{g} a, \quad (1)$$

где $Q_{\text{ч}}$ – вес частицы; $N_{\text{А}}$ – архимедова сила; O – сила сопротивления газовой среды; g – ускорение свободного падения; a – ускорение движения частицы.

Характеристическим размером частицы материала является диаметр эквивалентного шара d . Вес частицы равен

$$Q_{\text{ч}} = \frac{\rho d^3}{6} r_{\text{м}} g,$$

где $r_{\text{м}}$ – плотность материала.

Архимедова сила равна весу газа в объеме частицы, то есть

$$N_{\text{А}} = \frac{\rho_2 d^3}{6} r_{\text{г}} g,$$

где $r_{\text{г}}$ – плотность газовой среды.

Сила сопротивления:

$$O = \chi F_{\text{ч}} \frac{u^2}{2} r_{\Gamma},$$

где χ – коэффициент сопротивления; $F_{\text{ч}}$ – аэродинамическое сечение частицы; u – скорость частицы относительно газовой среды (относительная скорость газового потока, то есть скорость обтекания частицы потоком).

Аэродинамическое сечение частицы:

$$F_{\text{ч}} = \frac{\rho d^2}{4}.$$

Сначала частица падает ускоренно, но по мере возрастания скорости сила сопротивления среды увеличивается до тех пор, пока не наступит равновесие с силой тяжести. Дальнейшее падение будет проходить с постоянной скоростью, когда $a = 0$.

Тогда уравнение (1) принимает вид:

$$\frac{\rho d^3}{6} g(r_{\text{м}} - r_{\Gamma}) - \chi \frac{\rho d^2}{4} \cdot \frac{u^2}{2} r_{\Gamma} = 0.$$

Отсюда равномерная скорость частицы в неподвижной газовой среде (скорость осаждения)

$$u = 2 \sqrt{\frac{gd(r_{\text{м}} - r_{\Gamma})}{3\chi r_{\Gamma}}}. \quad (2)$$

Эта скорость по абсолютному значению равна скорости обтекания частицы в неподвижной газовой среде, то есть скорости газовой среды относительно частицы.

Коэффициент сопротивления χ зависит от критерия Рейнольдса Re . Как известно, для трёх режимов обтекания частицы газовой средой, зависимость χ от Re следующая [3]:

для ламинарного режима ($Re < 2$):

$$x = \frac{24}{\text{Re}}; \quad (3)$$

для переходного режима ($2 \leq \text{Re} \leq 500$):

$$x = \frac{18,5}{\text{Re}^{0,6}}; \quad (4)$$

для автомодельного режима ($500 < \text{Re} < 200000$):

$$x = 0,44. \quad (5)$$

Критерий Рейнольдса при обтекании частицы газом равен:

$$\text{Re} = \frac{u d r_{\Gamma}}{m}, \quad (6)$$

где u – скорость обтекания; m – динамическая вязкость газовой среды.

При движении частицы материала в восходящем потоке газа условием её витания является равенство скорости осаждения частицы и скорости газового потока.

Подставляя в уравнение (2) для каждого режима обтекания соответственно выражения (3), (4), (5) и учитывая зависимость (6), получим формулы скорости витания:

для ламинарного режима:

$$u = \frac{d^2 g (r_{\text{м}} - r_{\Gamma})}{18m}; \quad (7)$$

для переходного режима:

$$u \approx 0,153 \frac{g^{0,714} d^{1,143} (r_{\text{м}} - r_{\Gamma})^{0,714}}{m^{0,429} r_{\Gamma}^{0,286}}; \quad (8)$$

для автомодельного режима:

$$u \approx 1,741 \sqrt{\frac{gd(r_m - r_r)}{r_r}}. \quad (9)$$

Из зависимости (6) скорость витания равна:

$$u = \frac{Re m}{dr_r}. \quad (10)$$

Подставляя в уравнение (7), (8), (9) вместо скорости витания её выражение (10) и принимая соответствующие значения критерия Рейнольдса для каждого режима обтекания, получим область нахождения эквивалентного диаметра частиц материала для каждого режима движения частицы в газе.

Для ламинарного режима:

$$d < \sqrt[3]{\frac{36m^2}{gr_r(r_m - r_r)}}; \quad (11)$$

для переходного режима:

$$\sqrt[3]{\frac{36m^2}{gr_r(r_m - r_r)}} < d \leq 43,640 \frac{m^{0,667}}{g^{0,333}(r_r(r_m - r_r))^{0,333}}; \quad (12)$$

для автомодельного режима:

$$43,640 \frac{m^{0,667}}{g^{0,333}(r_r(r_m - r_r))^{0,333}} < d < 2363,415 \sqrt[3]{\frac{m^2}{gr_r(r_m - r_r)}}. \quad (13)$$

При температуре теплоносителя (воздуха) на входе в рабочую зону установки 400°C и плотности гипсового сырья $r_m = 2300 \text{ кг/м}^3$ имеем:

для ламинарного режима:

$$d < 1,492 \cdot 10^{-4} \text{ м};$$

для переходного режима:

$$1,492 \cdot 10^{-4} \text{ м} < d \leq 1,972 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

для автомоделного режима:

$$1,972 \cdot 10^{-3} \text{ м} < d < 0,107 \text{ м}.$$

Выше рассматривалось движение частицы материала в газовой среде без влияния на движение частицы соударения с другими частицами материала (когда порозность $e = 1$). Здесь под порозностью понимаем выражение:

$$e = \frac{V_{\Gamma}}{V_{\Gamma} + V_{\text{М}}}, \quad (14)$$

где V_{Γ} – объём в зернистом слое, занятый газом; $V_{\text{М}}$ – объём в зернистом слое, занятый частицами материала.

В режиме пневмотранспорта такое предположение допускается.

Подставим в формулу (14) вместо $V_{\text{М}}$ отношение $\frac{m_{\text{М}}}{r_{\text{М}}}$, где $m_{\text{М}}$ – масса частиц материала в слое. После преобразования имеем:

$$e = \frac{r_{\text{М}} g_1}{r_{\text{М}} g_1 + 1}, \quad (15)$$

$$\text{где } g_1 = \frac{V_{\Gamma}}{m_{\text{М}}}.$$

Значение параметра g_1 определяется из уравнения теплового баланса установки.

Однако, если концентрация частиц материала в потоке теплоносителя значительная, порозность $e < 1$, то последнюю надо учитывать при расчёте скорости витания.

Известна интерполяционная зависимость для всех режимов обтекания частиц газом, полученная обобщением опытных данных при $0,4 < e < 1$ [3]:

$$\text{Re} = \frac{\text{Ar}e^{4,75}}{18 + 0,6\sqrt{\text{Ar}e^{4,75}}}, \quad (16)$$

где Ar – критерий Архимеда, который равен:

$$Ar = \frac{d^3 g r_{\Gamma} (r_M - r_{\Gamma})}{m^2}. \quad (17)$$

Подставляя в формулу (10) вместо критерия Рейнольдса его выражение через критерий Архимеда (16) и учитывая выражения (17) и (15), получим формулу скорости витания для всех режимов обтекания частиц материала газом (с учётом порозности):

$$u = \frac{d^2 g r_M^{4,75} (r_M - r_{\Gamma}) g_1^{4,75}}{18m(r_M g_1 + 1)^{4,75} + 0,6 \sqrt{d^3 g r_{\Gamma} r_M^{4,75} (r_M - r_{\Gamma}) g_1^{4,75} (r_M g_1 + 1)^{4,75}}}. \quad (18)$$

Альтшуль, Животовский и Иванов [4] приводят аппроксимированную приблизительную зависимость $Re=f(Ar)$ для сферических частиц при любом режиме обтекания, которая имеет хорошее практическое подтверждение:

$$Re = -27,27 + \sqrt{27,27^2 + 3,03 Ar e^{4,75}}. \quad (19)$$

Рассчитывая скорость витания с помощью выражений (10), (19), (17) и (15), получим:

$$u = \frac{-27,27m + \sqrt{(27,27m)^2 + \frac{3,03d^3 g r_{\Gamma} r_M^{4,75} (r_M - r_{\Gamma}) g_1^{4,75}}{(r_M g_1 + 1)^{4,75}}}}{d r_{\Gamma}}. \quad (20)$$

При порозности в пределах $0,4 < e < 0,6$ движение частиц материала в восходящем потоке теплоносителя подобно движению в псевдооживленном состоянии, так как в последнем случае порозность обычно находится в таких же пределах. Поэтому скорость витания частиц при такой порозности можно отождествить со скоростью псевдооживления.

Ахундов, Петрихина, Полинковская, Пржецлавский [5] приводят следующие зависимости для критерия Рейнольдса при псевдооживлении:

$$Re = 0,101(Ar(1 - e))^{0,714}; \quad (21)$$

$$\text{Re}^{1,56} = \frac{2}{130} \text{Ar}e^{1,56} \left(\frac{d_{\max}}{d} \right)^{0,6}; \quad (22)$$

$$\text{Re} = 0,095 \text{Fe}^{1,56}, \quad (23)$$

где Fe – критерий Фёдорова, который равен [6]:

$$\text{Fe} = d \cdot \sqrt[3]{\frac{4 \cdot g \cdot r_{\Gamma} (r_{\text{M}} - r_{\Gamma})}{3 \cdot m^2}}. \quad (24)$$

По зависимости (21) скорость псевдоожигения (или витания при $0,4 < e < 0,6$) равна:

$$u = \frac{0,101 d^{1,142} g^{0,714} (r_{\text{M}} - r_{\Gamma})^{0,714}}{m^{0,428} r_{\Gamma}^{0,286} (r_{\text{M}} g_1 + 1)^{0,714}}. \quad (25)$$

По зависимости (22) скорость псевдоожигения (витания) равна:

$$u \approx \frac{0,069 d^{0,538} d_{\max}^{0,385} g^{0,641} r_{\text{M}} (r_{\text{M}} - r_{\Gamma})^{0,641} g_1}{m^{0,282} r_{\Gamma}^{0,359} (r_{\text{M}} g_1 + 1)}. \quad (26)$$

По зависимости (23) скорость псевдоожигения (витания) равна:

$$u \approx \frac{0,11 g^{0,52} d^{0,56} (r_{\text{M}} - r_{\Gamma})^{0,52}}{m^{0,04} r_{\Gamma}^{0,48}}. \quad (27)$$

Дэвидсоном и Харрисоном [7] выводится следующая формула скорости псевдоожигения при $e = 0,476$:

$$u = 0,00114 g d^2 (r_{\text{M}} - r_{\Gamma}) / m. \quad (28)$$

Распространённым [6, 8, 9] является метод определения скорости витания с помощью критерия Лященко Ly:

$$u = \sqrt[3]{\frac{\text{Ly} \cdot m \cdot r_{\text{M}} \cdot g}{r_{\Gamma}^2}}. \quad (29)$$

Критерий Лященко определяется по графической зависимости от критерия Архимеда.

Рассмотренные формулы скорости витания сведены в табл. 1. Значения рассчитаны при следующих параметрах: эквивалентный диаметр гипсовых частиц $d = 0,0002$ м, $d_{\max} = 0,0003$ м, температура воздуха 400 °С, количество теплоносителя, расходуемое на единицу массы полугидрата сульфата кальция $g_1 = 4,437$ м³/кг (найденно из уравнения теплового баланса установки).

Из табл. 1 видно, что формулы с номерами 1, 2 и 8 дают довольно близкие между собой значения. В то время как другие формулы дают значительно больший разброс значений.

Таблица 1

Формулы скорости витания частиц материала на входе в рабочую зону установки и соответствующие рассчитанные значения

Номер	Формула	Значение, м/с
1	$u \approx 0,153 \frac{g^{0,714} d^{1,143} (r_M - r_r)^{0,714}}{m^{0,429} r_r^{0,286}}$	1,168
2	$u = \frac{d^2 g r_M^{4,75} (r_M - r_r) g_1^{4,75}}{18m(r_M g_1 + 1)^{4,75} + 0,6 \sqrt{d^3 g r_r^{4,75} (r_M - r_r) g_1^{4,75} (r_M g_1 + 1)^{4,75}}}$	1,157
3	$u = \frac{-27,27m + \sqrt{(27,27m)^2 + \frac{3,03d^3 g r_r^{4,75} (r_M - r_r) g_1^{4,75}}{(r_M g_1 + 1)^{4,75}}}}{d r_r}$	1,402
4	$u = \frac{0,101 d^{1,142} g^{0,714} (r_M - r_r)^{0,714}}{m^{0,428} r_r^{0,286} (r_M g_1 + 1)^{0,714}}$	$1,057 \cdot 10^{-3}$
5	$u \approx \frac{0,069 d^{0,538} d_{\max}^{0,385} g^{0,641} r_M (r_M - r_r)^{0,641} g_1}{m^{0,282} r_r^{0,359} (r_M g_1 + 1)}$	0,444
6	$u \approx \frac{0,11 g^{0,52} d^{0,56} (r_M - r_r)^{0,52}}{m^{0,04} r_r^{0,48}}$	0,353
7	$u = 0,00114 g d^2 (r_M - r_r) / m$	0,031
8	$u = \sqrt[3]{\frac{Ly \cdot m \cdot r_M \cdot g}{r_r^2}}$	1,142

Поэтому при близких ко взятым для расчета параметрах материала и теплоносителя скорость витания частиц лучше определять по формулам номер

1, 2 и 8 (табл. 1). Как видим, в формулах 1 и 8, в отличие от формулы 2, не учтена удельная затрата теплоносителя на единицу продукта (g_1). Но по сравнению с формулой 2 формулы 1 и 8 более просты.

Скорость витания частиц и скорость газового потока связаны зависимостью:

$$u_z = u_g \cdot k, \quad (30)$$

где u_g – скорость газового потока; u_z – скорость витания частиц; k – коэффициент запаса.

Значение коэффициента запаса k зависит от размера наибольших частиц материала и условий транспортирования материала газовым потоком [6, 10, 11]. По мнению разных авторов значение коэффициента запаса следует принимать в интервалах: 1,3 ... 1,5 [6]; 1,5 ... 2,0 [10]; 1,5 ... 2,5 [11].

В данном случае процесс пневмотранспорта усложняется тем, что одновременно с транспортированием происходит химическая реакция разложения дигидрата сульфата кальция с превращением его в полугидрат. В результате реакции выделяется газ, который увеличивает количество газового потока. Поэтому для установки по дегидратации гипса в потоке теплоносителя неизвестно точное значение коэффициента k , которое бы позволяло рассчитывать минимально необходимую скорость газового потока для подъема и транспортирования частиц гипса с одновременным преобразованием дигидрата в полугидрат. Чтобы определить коэффициент k на входе в рабочую зону установки, были проведены экспериментальные исследования на лабораторной модели установки. Параметры материала и теплоносителя были такими же, которые брались для расчёта скорости витания. Определялась скорость газового потока, при которой начинается транспортирование частиц материала. В результате она составила 6,765 м/с.

Тогда, усредняя значение скорости витания, рассчитанное по формулам 1, 2 и 8 (табл. 1), находим коэффициент запаса k :

$$k = \frac{6,765}{(1,168 + 1,157 + 1,142)/3} \approx 5,854.$$

Определённый коэффициент k позволяет рассчитывать с помощью выражения (30) минимально необходимую скорость теплоносителя для транс-

портирования гипсовых частиц, поступающих на дегидратацию.

Выводы:

1. Рассмотрены и раскрыты существующие формулы для определения скорости витания частиц материала.

2. Выделены те формулы, которые наиболее целесообразно использовать при пневмотранспорте гипсовых частиц в потоке теплоносителя.

3. Найден коэффициент, позволяющий рассчитывать минимально необходимое значение скорости газового потока для транспортирования частиц гипса, поступающих на дегидратацию.

Список литературы: 1. *Зайончковский Я.* Обеспыливание в промышленности. – М.: Стройиздат, 1969. – 352 с. 2. *Давитулиани В.В., Булкин В.А.* Псевдоожигение и аппараты с кипящим слоем. – Казань, 1974. 3. *Касаткин А.Г.* Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1971. – 784 с. 4. *Альтишуль А.Д., Животовский Л.С., Иванов Л.П.* Гидравлика и аэродинамика. – М.: Стройиздат, 1987. – 414 с., ил. 5. *Ахундов А.А., Петрихина Г.А., Полинковская А.И., Пржецлавский В.Л.* Обжиг в кипящем слое в производстве строительных материалов. – М.: Стройиздат, 1975. – 248 с., ил. 6. *Лебедев П.Д., Шукин А.А.* Теплоиспользующие установки промышленных предприятий. – М.: Энергия, 1970. 7. *Дэвидсон И.Ф., Харрисон Д.* Псевдоожигение твёрдых частиц. – М.: Химия, 1965. – 184 с. 8. *Лыков М.В.* Сушка в химической промышленности. – М.: 1970. 9. *Романков П.Г., Рашковская Н.Б.* Сушка во взвешенном состоянии. – Л.: Химия, 1979. – 272 с. 10. *Доманский И.В., Исаков В.П., Островой Г.М. и др.* Машины и аппараты химических производств: Примеры и задачи. Под общ. ред. В.Н. Соколова – С-Пб.: Политехника, 1992. – 327с. 11. *Теплотехнический справочник.* В 2-х т. Под ред. В.Н. Юренева и П.Д. Лебедева. М.: Энергия, 1975.

Поступила в редколлегию 11.09.08