

И.В. ЕРЕМЕЕВ

(Россия, Гуково, ЦОФ "Гуковская")

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ОБЕЗВОЖИВАНИЯ УГОЛЬНЫХ ШЛАМОВЫХ СУСПЕНЗИЙ НЕФЛОТАЦИОННОЙ КРУПНОСТИ НА ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ГРОХОТЕ С РАЗНОНАКЛОННЫМИ УЧАСТКАМИ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

В технологии углеобогащения широко применяются процессы обезвоживания шламов на виброгрохотах. Качество продуктов обезвоживания в значительной мере определяется параметрами вибрации рабочей поверхности грохота. Однако в настоящее время отсутствуют адекватные физические модели процесса обезвоживания суспензий на вибрирующей ситовой поверхности, позволяющие производить выбор оптимальных режимных параметров.

В настоящей статье сделана попытка разработки физической модели процесса обезвоживания при движении потока суспензии на вибрирующем сите при монотонном снижении концентрации жидкой фазы.

Известно [1], что процесс обезвоживания суспензии на виброгрохоте можно условно разделить на три этапа.

На первом этапе, характеризуемом значительным содержанием жидкой фазы, происходит предварительное обезвоживание, обусловленное главным образом гидростатическим давлением слоя суспензии; на втором этапе процесс обезвоживания обусловлен инерционной составляющей виброколебаний, обеспечивающий отрыв свободной влаги из межпорового пространства слоя материала; на третьем этапе процесс обезвоживания происходит за счет виброуплотнения слоя материала сопровождающемся выделением свободной влаги из порового пространства слоя.

На первом этапе исходная суспензия, подаваемая на грохот, имеет довольно низкую концентрацию жидкой фазы и может рассматриваться как однородная жидкость с эффективной вязкостью, превышающей вязкость жидкой фазы. Для малой концентрации взвешенных частиц правильной формы эффективная вязкость суспензии вычисляется по простым формулам [2]. Вибрационное воздействие повышает вязкость суспензии, т.к. амплитуды колебаний твердых частиц меньше амплитуды колебаний частиц жидкости. Поэтому для случая малой концентрации твердых частиц выделение жидкой фазы через отверстия сита эффективнее для неподвижной просеивающей поверхности. Если скорость течения суспензии по ситам не очень высока, то истечение жидкости через отверстия сита будет определяться глубиной потока суспензии.

На первом этапе происходит перевод угольной суспензии в высококонцентрированную за счет сброса свободной воды.

На втором этапе осуществляется перевод высококонцентрированной суспензии в вязкопластичный материал за счет удаления внешней влаги.

Начало третьего этапа соответствует состоянию водонасыщенной системы

Збагачення корисних копалин, 2013. – Вип. 54(95)

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

твердых частиц, при котором частицы имеют регулярные контакты друг с другом. На этой стадии процесс обезвоживания уже определяется процессом виброуплотнения частиц твердой фазы и удалением освободившейся из межчастичного пространства жидкости сквозь сито.

Известно, что при вибрации структурированной суспензии изменяются ее реологические свойства. Экспериментально установлено [3], что деформация смеси (или ее скорость) при неизменном по сравнению со статическим средним напряжением увеличивается в $\left[1 + \alpha \left(A\omega^2 / g \right)\right] \psi(Ti)$ раз, где A и ω – соответственно, амплитуда и частота колебаний; $\psi(Ti)$ – функция удельной тиксотропии, зависящая от грансостава и обращающаяся в единицу при отсутствии вибрации; g – ускорение силы тяжести; α – константа.

Решением проблемы установления связи между режимами вибрации и вязкости высококонцентрированных суспензий занимались многие авторы [3]. В результате получены полуэмпирические формулы, включающие различные критерии интенсивности вибрации. Наиболее достоверными считаются критерий интенсивности $u = A\omega^2 / g$ и зависимость вязкости от режима вибрации $\eta = \eta_0 + \alpha / u$, где η_0 – вязкость полностью разрушенной структуры. Таким образом, качество обезвоживания на этой стадии существенно зависит от параметров вибрации обезвоживающей поверхности.

Установлено [4], что уплотнение дисперсной среды определяется величиной ускорения прикладываемых к ней колебаний. Причем, оптимальное значение ускорения зависит от физико-механических свойств среды. Уплотнение среды происходит вследствие снижения сил трения между частицами за счет действия сил инерции и сил тяжести.

Экспериментально установлено [4], что при воздействии вибрации с оптимальным для уплотнения ускорением частицы среды с большой плотностью и больших размеров могут подниматься на поверхность слоя. Это явление объясняется разницей значений оптимальных ускорений для частиц разной крупности и плотности в процессе виброуплотнения.

Известно также, что при более высоких частотах максимальное уплотнение достигается при меньших амплитудах. Однако с увеличением частоты степень максимального уплотнения снижается. Возрастание амплитуды колебаний только до известного предела способствует повышению плотности. Каждому значению амплитуды соответствует определенная наивыгоднейшая частота колебаний, способствующая достижению максимального уплотнения.

Результаты исследований влияния продолжительности процесса виброуплотнения на степень уплотнения [4] показали, что процесс уплотнения протекает неравномерно с убывающей скоростью: более интенсивно в начальный момент, а затем скорость уплотнения уменьшается. Такая неравномерность объясняется тем, что по мере уплотнения среды площадь поверхностей контакта между частицами увеличивается, вследствие чего эффективность воздействия вибрации снижается.

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

На третьем этапе обезвоживание суспензии осуществляется в две стадии [5]: переукладка частиц твердой фазы и их сближение.

На стадии переукладки под действием вибрации происходит разрушение и перестройка неустойчивой случайной структуры частиц, которые под действием силы тяжести стремятся занять наиболее выгодное энергетическое положение.

Причиной разрушения структурированной системы дисперсных частиц является относительное инерционное смещение частиц твердой фазы различной плотности и размера.

Величина этого смещения тем больше, чем больше масса частицы, выше ускорение колебаний, больше разность плотностей частицы и среды, чем меньше вязкость системы. В конце стадии переукладки система приобретает устойчивую структуру.

На стадии сближения существенного изменения структуры частиц не происходит. Уплотнение смеси осуществляется в результате сближения частиц, их раздвижки и относительных сдвигов, что обусловлено не только вибровоздействием, но и перераспределением по объему жидкой фазы. Время второй стадии значительно больше продолжительности первой. На этой стадии при относительном смещении частиц происходит "отжатие" жидкой фазы из пор смеси.

На конечной стадии обезвоживания возможно образование тиксотропной структурированной системы, образованной в результате коагуляционных взаимодействий. В результате действия эффекта вибрационного упрочнения структуры возможно образование новых упрочненных контактов, что приводит к образованию твердообразной дисперсной структуры.

На основании изложенных представлений о процессе обезвоживания упрощенная динамическая модель слоя суспензии на рабочей поверхности виброгрохота может быть интерпретирована вязкопластическим реологическим телом с присоединенной массой, равной массе стержня единичного сечения, высота которого равна высоте слоя обводненного материала, а плотность равна плотности суспензии. В результате действия вибрации предел текучести материала $\sigma_0 \rightarrow 0$, а напряжение в пластическом элементе пропорционально деформации: $\sigma_n = k_i \varepsilon_i$, где k_i – коэффициент пластичности, а ε_i – деформация пластического элемента. Кроме того, полагаем, что высота слоя обезвоженного материала равна h_m , и тогда напряжение в пластическом элементе на этапе уплотнения слоя пропорциональна величине $(h_1 - h)/(h_1 - h_m)$, т.е. сопротивление пластической деформации изменяется от нуля до k_i .

Полагаем, что высота слоя обезвоживаемого материала $h = h(t)$ является медленно изменяющимся параметром, остающимся неизменным в течение одного периода колебаний рабочей поверхности. Тогда уравнение движения слоя обезвоживаемого материала на сите грохота под действием пульсирующей нагрузки $F_0 \sin \omega t$, соответствующее i -му периоду колебаний, будет:

$$\rho h(t) \ddot{y} + K \dot{y} + \frac{h(t)}{h(t) - h_m} k_i y = F_o \sin \omega t. \quad (1)$$

где ρ – плотность обезвоживаемого материала; K – коэффициент вязкого сопротивления; F_o и ω – соответственно, амплитуда возмущающей силы и частота вынужденных колебаний рабочей поверхности грохота.

Вследствие того, что пластические деформации слоя необратимы и развиваются только в направлении снижения $h(t)$, то в течение полупериода колебаний слой движется как твердое тело массой ρh_i , а в течение второго полупериода как инерционное вязкопластическое бингамово тело в соответствии с уравнением (1).

Решение уравнения (1) ищется в виде

$$y = A_i \sin \omega t + B_i \cos \omega t. \quad (2)$$

После подстановки выражения (2) в уравнение (1) и приравнивания нулю суммы коэффициентов при функциях $\sin \omega t$ и $\cos \omega t$ определим значения постоянных A_i и B_i .

Выражение (2) можно представить в виде:

$$A_i = F_o \frac{\frac{h_1 - h_i}{h_1 - h_m} k_i - \rho h_i \omega^2}{\left(\frac{h_1 - h_i}{h_1 - h_m} k_i - \rho h_i \omega^2 \right)^2 + K^2 \omega^2}, \quad (3)$$

$$B_i = \frac{F_o K \omega}{\left(\frac{h_1 - h_i}{h_1 - h_m} k_i - \rho h_i \omega^2 \right)^2 + K^2 \omega^2}.$$

$$y = a_i \sin(\omega t + \varphi_i), \quad (4)$$

где

$$a_i = \sqrt{A_i^2 + B_i^2} = F_o \left[\left(\frac{h_1 - h_i}{h_1 - h_m} k_i - \rho h_i \omega^2 \right)^2 + K^2 \omega^2 \right]^{-\frac{1}{2}},$$

$$\varphi_i = \arctg(B/A) = \arctg \frac{K \omega}{\rho h_i \omega^2 - \frac{h_1 - h_i}{h_1 - h_m}}.$$

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

Таким образом, колебания поверхности слоя обезвоживаемого материала происходят с частотой вынужденных колебаний, а сдвиг фазы в i -м периоде колебаний равен φ_i и зависит от высоты слоя.

В начальный момент уплотнения высота слоя обезвоживаемого материала $h = h_1$. При этом пластическая деформация равна нулю и движение материала характеризуется инерционными и вязкостными сопротивлениями. По мере уменьшения высоты слоя возникают и далее возрастают пластические сопротивления. Алгоритм вычисления изменяющейся высоты слоя состоит в следующем.

Полагаем $h = h_1$ и по формулам (3) вычисляем коэффициенты A_i и B_i . Затем по формуле (4) определяем a_1 – амплитуду колебаний в направлении уменьшения h для первого периода колебаний процесса уплотнения.

Тогда, за первый период колебаний изменение высоты слоя материала составит $\Delta h_1 = F_o / (\rho h_1 \omega^2) - a_1$. В начале второго периода ($i = 2$) колебаний $h_2 = h_1 - \Delta h_1$. Повторяя вычисления по формулам (3) и (4) определим $\Delta h_2 = a_1 - a_2$, $h_3 = h_2 - \Delta h_2$ и т.д. Итерационный процесс продолжается до достижения времени $t = i / 2\pi\omega$, равного времени разгрузки обезвоженного материала с сита грохота. Например, при частоте вращения дебалансного вала грохота 150 рад/с, средней скорости транспортирования материала при обезвоживании 0,1 м/с и длине участка сита, на котором обеспечивается собственно процесс виброуплотнения, равном 2 м, число итераций составит 3000.

Таким образом, на основании представления процесса обезвоживания суспензии на виброгрохоте, как процесса пульсирующего деформирования инерционного вязкопластичного тела, предложена динамическая модель, отвечающая уравнению (1), в котором коэффициент вязкости K является функцией интенсивности вибрационного воздействия $A\omega^2 / g$.

Список литературы

1. Полулях А.Д., Еремеев И.В. Изменение структурно-механических свойств угольного шлама в процессе обезвоживания на сите грохота // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2013. – Вип. 52(93). – С. 96-106.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. – М.: Наука, 1988. – 736 с.
3. Куннос Г.Я. Вибрационная технология бетона. – Л.: Стройиздат, 1967. – 168 с.
4. Гончаревич И.Ф., Фролов К.В. Теория вибрационной техники и технологии. – М.: Наука, 1981. – 320 с.
5. Савинов О.А., Лавринович Е.В. Вибрационная техника уплотнения и формирования бетонных смесей. – Л.: Стройиздат, 1986. – 280 с.

© Еремеев И.В., 2013

*Надійшла до редколегії 12.07.2013 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. О.Д. Полуляхом*