

**И.В. ЕРЕМЕЕВ**

(Россия, Гуково, ЦОФ "Гуковская")

**АНАЛИЗ УРАВНЕНИЯ СКОРОСТИ УПЛОТНЕНИЯ СЛОЯ МАТЕРИАЛА НА ВИБРИРУЮЩЕМ СИТЕ**

В работе [1] получено уравнение скорости уплотнения слоя материала на сите вибрационного грохота, которое имеет вид

$$\frac{dh}{dt} \approx - \frac{2h\tau_c}{\eta + \frac{k}{a\omega^3} + \frac{8h\tau_c}{\pi a\omega}}, \quad (1)$$

где  $\frac{dh}{dt}$  – вертикальное перемещение слоя;  $h$  – высота слоя материала;  $\tau_c$  – напряжение сдвига материала слоя;  $\eta$  – эффективная вязкость;  $\omega$  – частота колебаний;  $a$  – амплитуда колебаний;  $k$  – постоянный коэффициент.

Как видно из выражения (1) скорость уплотнения слоя зависит от текущей высоты слоя  $h$ , напряжение сдвига материала слоя  $\tau_c$ , эффективной вязкости  $\eta$ , а также от частоты  $\omega$  и амплитуды  $a$  колебаний рабочей поверхности.

Эффективная вязкость и напряжение сдвига материала слоя изменяются в процессе уплотнения за счет увеличения концентрации твердой фазы. Так, для отходов флотации ЦОФ "Суходольская" и ЦОФ "Криворожская" зависимости эффективной вязкости от содержания твердого, представленные на рис. 1, имеют нелинейный характер [2].

Аналогичный характер имеют зависимости напряжения сдвига от содержания твердой компоненты [2, 3].

Подобные зависимости могут быть хорошо аппроксимированы выражениями [4]:

$$\eta = \eta_o \cdot \frac{h_1 - h_o^*}{h - h_o^*}, \quad (2)$$

$$\tau_c = \tau_o \cdot \frac{h_2 - h_o^*}{h - h_o^*}, \quad (3)$$

где  $\eta_o$  и  $\tau_o$  – эффективная вязкость и напряжение сдвига при некотором начальном содержании твердого;  $h_1$ ,  $h_2$  и  $h$  – начальная и текущая высоты слоя;  $h_o^*$  – высота слоя при плотно упакованной смеси материала.

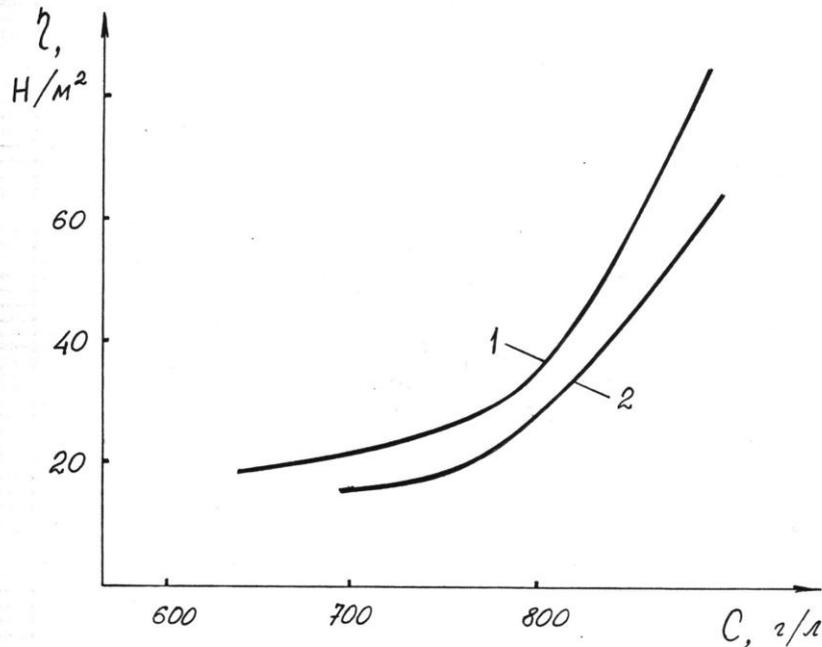


Рис. 1. Зависимость эффективной вязкости от содержания твердого в угольной суспензии:  
 1 – отходы флотации ЦОФ "Суходольская";  
 2 – отходы флотации ЦОФ "Криворожская"

Разность  $h - h_o^*$ , стоящая в знаменателях выражений (2) и (3), положительна и всегда больше 0.

Параметрами аппроксимации при описании экспериментально полученных зависимостей служат  $\eta_o$ ,  $\tau_o$ ,  $h_1$  и  $h_2$ .

Известно также [4, 5, 6], что эффективная вязкость дисперсной среды существенно зависит от динамических параметров рабочей поверхности, т.е.  $\eta = \eta(\alpha, \omega)$ . Предлагаемые зависимости вибровязкости от частоты и амплитуды колебаний следующие:  $\eta = \eta_o + k/\omega^3 a$  [4];  $\eta = \eta_o + \alpha/u$ ,  $\eta = \eta_o \exp(\alpha/u)$  [5];  $\eta = \eta_o + (\tau - \tau_c)/(1 + \alpha u) \dot{\epsilon}$  [6] и т.д., где  $\eta_o$  – вязкость предельно разрушенной дисперсной структуры;  $\alpha$ ,  $k$  – коэффициенты тиксотропии;  $u = \alpha \omega^2 / g$  – интенсивность вибрации;  $\dot{\epsilon}$  – градиент скорости деформирования материала.

Многообразие предлагаемых зависимостей  $\eta(\alpha, \omega)$  объясняется различием испытываемых материалов и способов приложения вибрации. Поэтому для построения адекватной зависимости  $\eta(\alpha, \omega)$  необходимо проведение представительного эксперимента с приложением вибрационного воздействия к образцу испытываемого материала в необходимом диапазоне изменения амплитуды и частоты.

Используя зависимости (2) и (3) для эффективной вязкости и напряжения

## **Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство**

сдвига, а также одну из зависимостей  $\eta(\alpha, \omega)$ , например,  $\eta = \eta_o + k/\omega^3$ , перепишем уравнение (1)

$$\frac{dh}{dt} \approx - \frac{2\pi\tilde{h}_2\tau_o a\omega^3 h}{\pi\tilde{h}_1(\eta_o a\omega^3 + k) + 8\tilde{h}_2\tau_o\omega^2 h}, \quad (4)$$

где обозначено:  $\tilde{h}_1 = h_1 - h_o^*$ ,  $\tilde{h}_2 = h_2 - h_o^*$ .

Интегрируя уравнение (4)

$$\frac{\tilde{h}_1(\eta_o a\omega^3 + k)}{2\tilde{h}_2\tau_o\omega^3 a} \int \frac{dh}{h} + \frac{4}{\pi a\omega} \int dh = - \int dt + C \quad (5)$$

при начальном условии

$$h = h_o \text{ при } t = 0, \quad (6)$$

получим

$$t = \frac{4}{\pi a\omega} (h_o - h) - \frac{\tilde{h}_1(\eta_o a\omega^3 + k)}{2\tilde{h}_2\tau_o\omega^3 a} \ln \frac{h}{h_o}. \quad (7)$$

Выражение (7) является уравнением кинетики уплотнения слоя материала на вибрирующей рабочей поверхности в процессе обезвоживания.

Для построения зависимостей влияния динамических параметров рабочей поверхности на показатели уплотнения слоя обезвоживаемого материала был проведен вычислительный эксперимент, в котором коэффициенты уравнений (4) и (7) предварительно выбраны в соответствие с результатами испытаний материалов, приведенными в работах [2-6]:  $\tau_o = 10 \text{ Н/м}^2$ ,  $k = 10^6 \text{ Н/м} \cdot \text{с}^2$ ,  $\eta_o = 10^3 \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$ ,  $\tilde{h}_1 = \tilde{h}_2 = 0,1 \text{ м}$ . По результатам вычислений построены графики влияния амплитуды и частоты колебаний рабочей поверхности на скорость процесса уплотнения материала в диапазоне изменения амплитуды от 0,25 до 4 мм и частоты от 25 до 400 рад/с (рис. 2). Как видно из графиков, в традиционном диапазоне частот и амплитуд колебаний существующих грохотов повышение частоты значительно эффективнее сказывается на повышении скорости уплотнения слоя, чем увеличение амплитуды колебаний. Например, для принятых констант материала повышение частоты колебаний рабочей поверхности от 25 до 200 рад/с. сопровождается интенсивным ростом скорости уплотнения для слоя 0,1 м, а при дальнейшем повы-

шени частоти колибаний скорость уплотнения резко снижается. С уменьшением слоя материала скорость уплотнения также снижается.

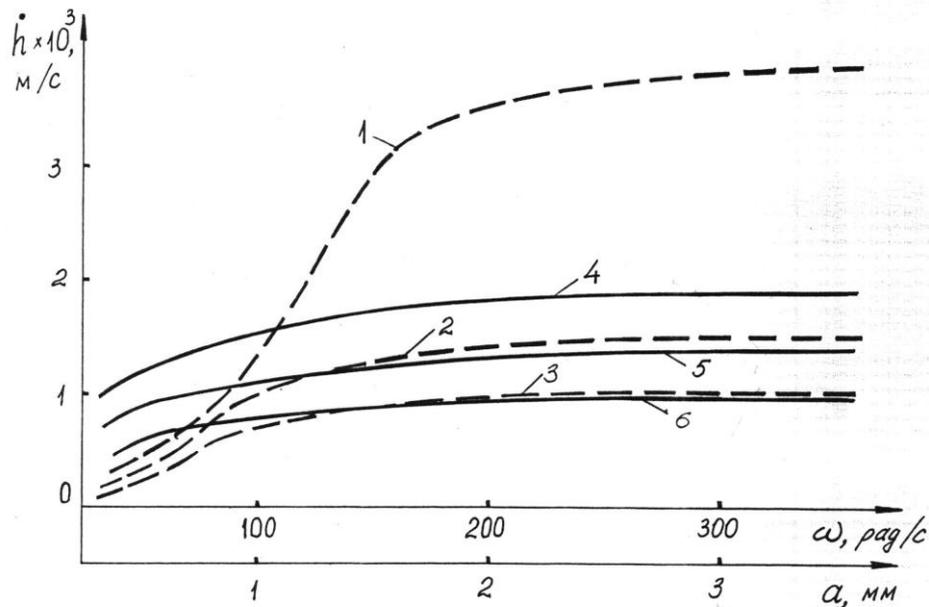


Рис. 2. Графики влияния амплитуды и частоты колебаний рабочей поверхности на скорость процесса уплотнения материала:

- 1, 2, 3 –  $f(\omega)$  при  $a = 2$  мм;  
 4, 5, 6 –  $f(a)$  при  $\omega = 100$  рад/с;  
 1, 4 –  $h = 0,1$  м; 2, 5 –  $h = 0,05$  м;  
 3, 6 –  $h = 0,01$  м

Увеличение амплитуды колебаний для модельного материала является эффективным до величины 2 мм, а при дальнейшем повышении амплитуды рост скорости уплотнения незначителен.

На рис. 3 приведены кривые кинетики уплотнения слоя модельного материала при амплитуде колебаний рабочей поверхности 2 мм и частотах от 25 до 400 рад/с, а на рис. 4 кинетические кривые при  $\omega = 150$  рад/с и амплитудах от 0,5 до 4 мм.

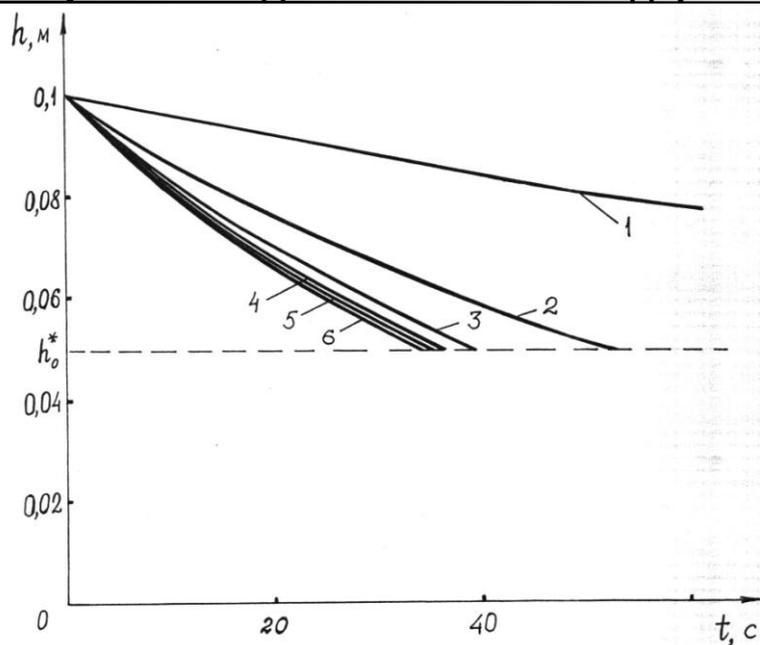


Рис. 3. Кривые кинетики уплотнения слоя модельного материала при амплитуде колебаний рабочей поверхности 2 мм и частотах: 1 – 25; 2 – 50; 3 – 100; 4 – 200; 5 – 300; 6 – 400 рад/с

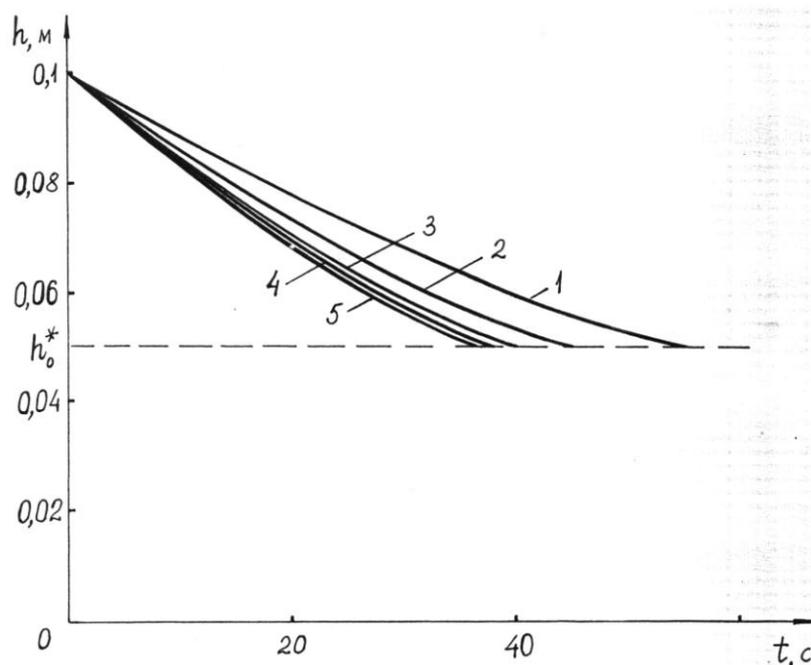


Рис. 4. Кинетические кривые при  $\omega = 150$  рад/с и амплитудах: 1 – 0,5; 2 – 1; 3 – 2; 4 – 3; 5 – 4 мм

Из рис. 3, 4 следует, что время перехода обезвоживаемого материала в структурированное состояние составляет порядка 40 с. После этого времени, для уплотнения структурированного материала необходимо изменение характера колебаний, которое на одном и том же грохоте может быть достигнуто изменением угла наклона конечной части рабочей поверхности. При этом направление колебаний должно быть более вертикальным.

## **Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство**

Таким образом, из разработанной модели обезвоживания следует, что рабочая поверхность обезвоживающего грохота должна состоять из трех участков: первый – участок сгущения с переходом исходной суспензии в концентрированное состояние; второй – участок структурирования с переходом концентрированной суспензии в вязкопластичный материал; третий – участок уплотнения с переходом вязкопластичного материала в уплотненное состояние подобное состоянию упругопластичного тела.

### *Выводы*

Процесс обезвоживания суспензии на сите виброгрохота состоит из трех этапов: на первом этапе, характеризующимся значительным содержанием жидкой фазы, происходит предварительное обезвоживание материала в виде его сгущения, обусловленное главным образом гидростатическим давлением слоя суспензии, во втором этапе происходит подготовительное обезвоживание материала в виде его структурирования, обусловленное главным образом гравитационной и возмущающей силой колебаний, сопровождающейся выделением основной части свободной влаги из порового пространства слоя; на третьем этапе происходит окончательное обезвоживание материала в виде его уплотнения, обусловленное главным образом возмущающей силой колебаний, сопровождающейся выделением остаточной части свободной влаги из порового пространства слоя.

### **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. 70-80.
2. Фоменко Т.Г., Кондратенко А.Ф. Отходы флотации и их свойства. – М.: Недра, 1977. – 125 с.
3. Полулях А.Д., Сансиев В.Г., Гарус В.К. Экспериментальные исследования деформационных свойств павлоградских концентрированных шламов // Обогащение полезных ископаемых: Науч.-техн. сб. – 2004. – Вып. 19(60). – С. 97-107.
4. Пальмов В.А. Колебание упруго-пластических тел. – М.: Наука, 1976. – 328 с.
5. Руденко И.Ф. Формирование изделий поверхностью виброустройствами. – М.: Стройиздат, 1971. – 104 с.
6. Куннос Г.Я. Вибрационная технология бетона. – Л.: Стройиздат, 1967. – 168 с.

© Еремеев И.В., 2013

*Надійшла до редколегії 24. 04.2013 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. О.Д. Полуляхом*