



УДК 622.794

Пилов П. И. /д. т. н./,  
Полулях А. Д. /д. т. н./,  
Полулях Д. А. /к. т. н./,

Еремеев И. В.,  
Сокур А. К., Иванченко А. Н.  
ГВУЗ «Национальный горный университет»

## Виброуплотнение как способ интенсификации обезвоживания на грохотах

Выполнено определение параметров виброуплотнения угольного шлама при обезвоживании на высокочастотном грохоте с разнонаклонными участками рабочей поверхности. Установлено, что виброуплотнение в слое угольного шлама нефлотационной крупности на обезвоживающей поверхности виброгрохота определяется его переходом из вязкопластичного в вязкоупругопластичное состояние, которое достигается при содержании твердого более 900 г/л, частоте и амплитуде колебаний сита, соответственно, 1500-2000 мин<sup>-1</sup> и 1,5-2,0 мм, при этом время виброуплотнения должно быть не менее 35 сек. Ил. 4. Библиогр.: 9 назв.

**Ключевые слова:** параметры виброуплотнения, угольный шлам, обезвоживание, грохот

*Determination of vibration compaction parameters of coal slime during water removal on high frequency screen with differently inclined areas of working surface is fulfilled. It is determined that vibration compaction in coal slime of non-flotation grade on the dewatering surface of shaking screen may be determined by its transfer from spreadable into viscoelastic condition, which is achieved at solid content more than 900 g/l, frequency of amplitude of oscillations of the screen 1500-2000 min<sup>-1</sup> and 1,5-2,0 mm respectively, herein the time of vibration compaction should be minimum 35 sec.*

**Keywords:** vibration compaction parameters, coal slime, water removal, screen

### Проблема и ее связь с научными и практическими задачами

Процессы обезвоживания зернистых материалов нашли широкое применение в угольной, горнорудной, металлургической и других отраслях промышленности. При этом требования к содержанию влаги в товарных продуктах обогащения постоянно возрастают, что заставляет обращать внимание многих исследований к повышению эффективности механического обезвоживания шламовых продуктов, содержащих наибольшее количество воды.

Наряду с работами по конструированию грохотов, оптимизации их параметров, улучшению пропускной способности рабочих поверхностей, перспективным направлением совершенствования процесса механического обезвоживания является формирование структуры исходного материала с учетом его реологических свойств и подбора под них рациональных параметров вибровозбуждения. Поскольку такое формирование связано с изменением концентрации твердых частиц в жидкой среде, характеризующейся реологическими свойствами и переходящей из одного состояния в другое по мере передвижения по вибрирующей обезвоживающей поверхности, то оно зависит от режима виброколебаний.

Таким образом, в основе механизма обезвоживания шламовых суспензий следует рассматривать величину концентрации твердых частиц на участках рабочей поверхности, которая изменяется по мере удаления воды под сито, предопределяя при этом появление новых физико-механических свойств в надситном продукте грохота и возможность применения иных интенсифицирующих водоотделение воздействий.

### Анализ исследований и публикаций

Одной из задач при расчете параметров вибровозбуждения грохотов является правильное представление физики процесса обезвоживания и установление на этой основе взаимосвязи реологических параметров исходных шламовых суспензий с амплитудой и частотой колебаний рабочей поверхности и ее углом наклона. При этом следует учитывать сложный характер межфазных и внутрифазных сил [1, 2], который ограничивает область применения известных зависимостей [1, 3, 4].

Реологические особенности угольных шламовых суспензий рассмотрены в работах [5-8]. Одним из недостатков этих работ является отсутствие однозначности зависимостей между реологическими параметрами материала и параметрами вибровозбуждения.

Согласно работам [9], структуру угольного шлама на вибрирующей поверхности можно рассматривать как реологическую модель Бингама-Шведова. Такие модели использованы в работах В. Г. Сансиева и В. К. Гаруса для разработки технологий тонкого грохочения угольного илосодержащего шлама.

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что процесс обезвоживания угольных шламовых суспензий осуществляется в три этапа. На первом этапе происходит перевод угольной суспензии в высококонцентрированную за счет сброса свободной воды под действием гидростатического давления; на втором – перевод высококонцентрированной суспензии в вязкопластичный материал, за счет отрыва свободной влаги из межпорового пространства материала под действием инерционных сил; на третьем – перевод вязкопластичного материала в

вязкоупругопластичный материал за счет частичного удавления капиллярной влаги путем виброуплотнения частиц.

Если два этапа процесса обезвоживания достаточно подробно рассмотрены в работах [16-18], то условия и закономерности виброуплотнения материала на конечной стадии обезвоживания до настоящего времени определены не были.

**Постановка задачи**

Цель данной работы – определение параметров виброуплотнения угольного шлама при обезвоживании на высокочастотном грохоте с разнонаклонными участками рабочей поверхности.

**Изложение материала и результаты**

В работе 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. Эти зависимости имеют нелинейный характер [3].

Подобные зависимости могут быть хорошо аппроксимированы выражениями:

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

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

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.

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, что эффективная вязкость дисперсной среды существенно зависит от динамических

параметров рабочей поверхности, т. е.

$$\eta = \eta(a, \omega)$$

Предлагаемые зависимости вязкоупругости от частоты и амплитуды колебаний следующие:

$$\eta = \eta_o + k / \omega^3 a \quad [4];$$

$$\eta = \eta_o + \alpha / u;$$

$$\eta = \eta_o + (\tau - \tau_c) / (1 + \alpha u) \dot{\epsilon}$$

$$\eta = \eta_o \exp(\alpha / u)$$

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.

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

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

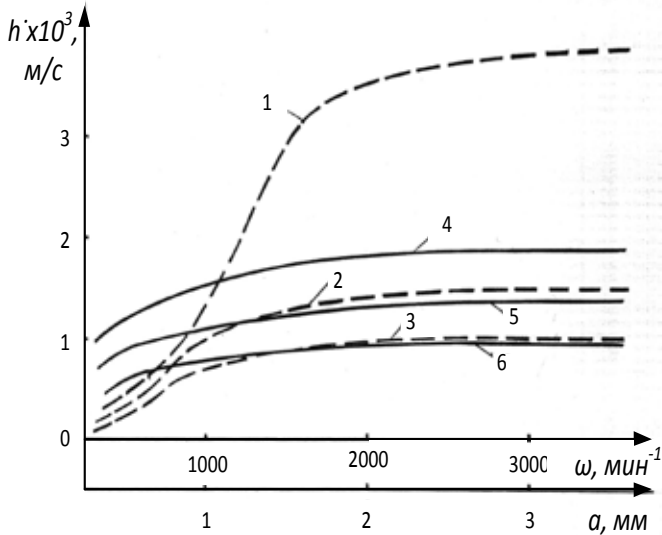
Выражение (7) является уравнением кинетики уплотнения слоя материала на вибрирующей рабочей поверхности в процессе обезвоживания.

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 соответствии с результатами испытаний материалов, приведенными в работах [3]:

$$\tau_o = 10 \text{ Н/м}^2, k = 10^6 \text{ Н/м} \cdot \text{с}^2,$$

$$\eta_o = 10^3 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2, \quad \tilde{h}_1 = \tilde{h}_2 = 0,1 \text{ м.}$$

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 500 до 3000 мин<sup>-1</sup> (рис. 1).

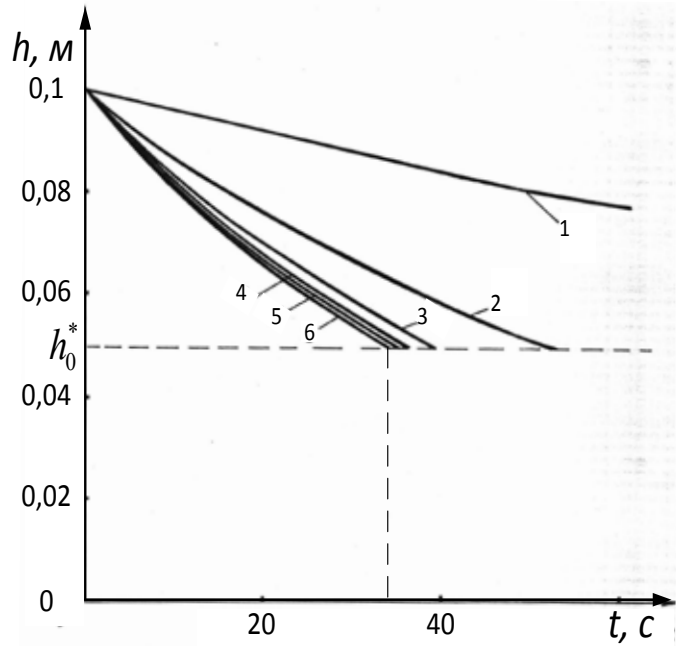


**Рис. 1.** Графики влияния амплитуды и частоты колебаний рабочей поверхности на скорость процесса уплотнения материала: 1, 2, 3 –  $f(\omega)$  при  $a = 1$  мм; 4, 5, 6 –  $f(a)$  при  $\omega = 750$  мин<sup>-1</sup>. Высота слоя: 1, 4 –  $h = 0,1$ ; 2, 5 –  $h = 0,05$ ; 3, 6 –  $h = 0,025$  мм

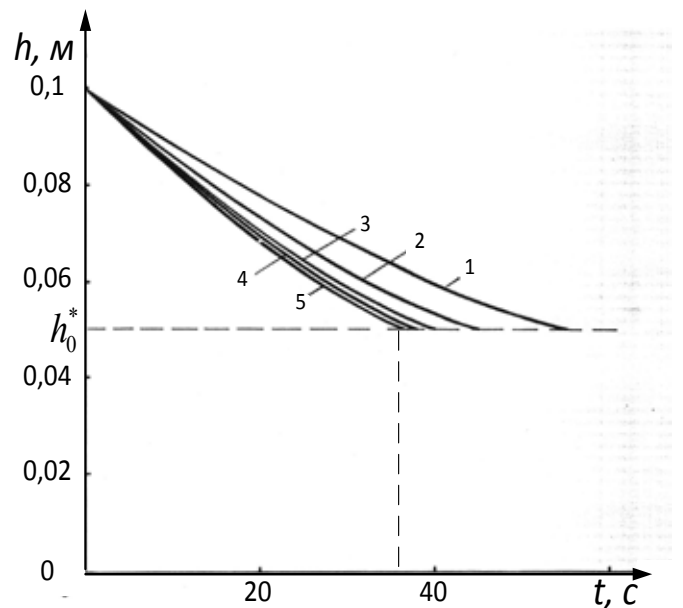
Как видно из графиков, в традиционном диапазоне частот и амплитуд колебаний существующих грохотов повышение частоты значительно эффективнее сказывается на повышении скорости уплотнения слоя, чем увеличение амплитуды колебаний. Например, для принятых констант материала повышение частоты колебаний рабочей поверхности от 500 до 1500 мин<sup>-1</sup> сопровождается интенсивным ростом скорости уплотнения для слоя 0,1 м, а при дальнейшем повышении частоты колебаний скорость уплотнения резко снижается. С уменьшением слоя материала скорость уплотнения также снижается.

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

На рис. 2 приведены кривые кинетики уплотнения слоя модельного материала при амплитуде колебаний рабочей поверхности 2 мм и частотах от 500 до 3000 мин<sup>-1</sup>, а на рис. 3 кинетические кривые при  $\omega = 1500$  мин<sup>-1</sup> и амплитудах от 0,5 до 4 мм.



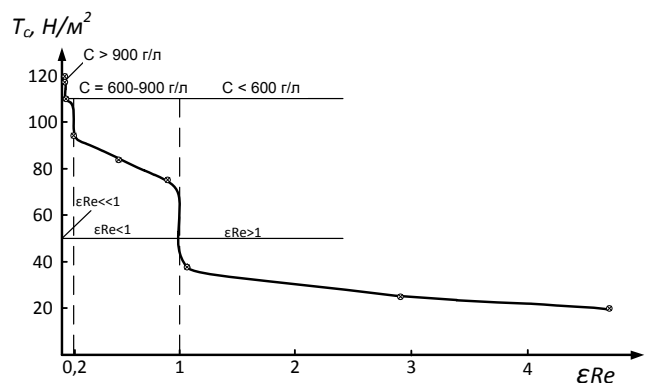
**Рис. 2.** Кривые кинетики уплотнения слоя модельного материала при амплитуде колебаний рабочей поверхности 2 мм и частотах: 1 – 500 мин<sup>-1</sup>; 2 – 1000 мин<sup>-1</sup>; 3 – 1500 мин<sup>-1</sup>; 4 – 2000 мин<sup>-1</sup>; 5 – 2500 мин<sup>-1</sup>; 6 – 3000 мин<sup>-1</sup>



**Рис. 3.** Кинетические кривые при  $\omega = 1500$  мин<sup>-1</sup> и амплитудах: 1 – 0,5 мм; 2 – 1,5 мм; 3 – 2,5 мм; 4 – 3,5 мм; 5 – 4,0 мм

Из рис. 2, 3 следует, что уплотнение материала до структурированного вязкопластичного состояния составляет порядка 35 с.

Результаты определения реологических констант и напряжений сдвига приведены на рис. 4.



**Рис. 4.** Влияние реологических констант  $\epsilon Re$  на напряжение сдвига  $\tau_c$  при обезвоживании угольного шлама нефлотационной крупности на высокочастотном грохоте с разнонаклонными участками рабочей поверхности

Из рис. 4 следует, что имеются три характерных области обезвоживания, на которых зависимости  $\tau_c = f(\epsilon Re)$  имеют прямолинейный характер, но различные углы наклона. Эти области можно характеризовать значениями  $\epsilon Re > 1$ ,  $\epsilon Re < 1$  и  $\epsilon Re \ll 1$ , при этом содержание твердого в надситном продукте повышается соответственно с 200 г/л до 600 г/л, с 600 г/л до 900 г/л, с 900 г/л до 1100 г/л и более. При этом на начальной стадии обезвоживания напряжение сдвига не превышает 35 Н/м<sup>2</sup>, потом при переходе на уровень  $\epsilon Re < 1$  оно делает скачок в 2 раза с 35 Н/м<sup>2</sup> до 70 Н/м<sup>2</sup> и растет плавно до 95 Н/м<sup>2</sup>, потом делает второй скачок с 95 Н/м<sup>2</sup> до 110 Н/м<sup>2</sup> и далее медленно, но прямолинейно увеличивается до 120 Н/м<sup>2</sup> и более.

Таким образом, для достижения максимального эффекта обезвоживания угольного шлама нефлотационной крупности параметры вибровозбуждения подбираются в зависимости от физико-механических свойств исходного материала таким образом, чтобы переход вязкой суспензии в вязкопластичный и вязкоупруго-пластичный материал осуществлялся путем последовательного сгущения, концентрации и уплотнения частиц на разнонаклонных участках перфорированной вибрирующей поверхности при следующих реологических константах, соответственно,  $\epsilon Re > 1$ ,  $\epsilon Re < 1$ ,  $\epsilon Re \ll 1$ .

Начало виброуплотнения в слое угольного шлама нефлотационной крупности на обезвоживающей поверхности виброгрохота определяется переходом его из вязкопластичного в вязкоупругопластичное состояние, которое достигается при содержании твердого более 900 г/л и частоте и амплитуде колебаний сита соответственно 1500-2000 мин<sup>-1</sup> и 1,5-2,0 мм, при этом время виброуплотнения должно быть не менее 35 с.

### Выводы и направление дальнейших исследований

1. Процесс обезвоживания на сите виброгрохота должен состоять из трех этапов: сгущения, концентрации и уплотнения.

2. Рабочая поверхность обезвоживающего грохота должна иметь не симметричную S-образную форму в виде трех разнонаклонных участков.

3. Рациональные значения амплитуды и частоты вибрационных грохотов при обезвоживании угольных шламов составляют, соответственно, 1,5-2,0 мм и 1500-2000 мин<sup>-1</sup>, при этом время виброуплотнения должно быть не менее 35 с.

Дальнейшие исследования авторов будут направлены на анализ влияния вибровозбуждения на реологические константы потока материала на сите высокочастотного грохота с разнонаклонными участками рабочей поверхности.

### Библиографический список

1. Нигматулин Р. И. Основы механики гетерогенных сред / Р. И. Нигматулин. – М.: Наука, 1978. – 336 с.
2. Фортъе А. Механика суспензий / А. Фортъе. – М.: Мир, 1971. – 264 с.
3. Фоменко Т. Г. Отходы флотации и их свойства [Рис. 1.6] / Т. Г. Фоменко, А. Ф. Кондратенко. – М.: Недра, 1977. – 125 с.
4. Лапшин Е. С. Пути интенсификации обезвоживания минерального сырья на вибрационных грохотах / Е. С. Лапшин, А. И. Шевченко // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2011. – Вип. 47(88). – С. 144-151.
5. Урьев Н. Б. Высококонцентрированные дисперсные системы [Текст] / Н. Б. Урьев. – М.: Химия, 1980. – 320 с.
6. Гончаревич И. Ф. Виброреология в горном деле / И. Ф. Гончаревич. – М.: Наука, 1972. – 144 с.
7. Сансиев В. Г. Тонкое грохочение угольных шламов / В. Г. Сансиев // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2000. – Вип. 7(48). – С. 71-75.
8. Полулях А. Д. Исследование реологической модели высококонцентрированного ило-содержащего угольного шлама / А. Д. Полулях, В. Г. Сансиев, В. К. Гарус // Вибрации в технике и технологиях. – 2009. – № 1(33). – С. 55-58.
9. Уилкинсон У. Л. Неньютоновские жидкости / У. Л. Уилкинсон. – М.: Мир, 1964. – 216 с.

Поступила 03.04.2014