

УДК 622.794

Д.А. ПОЛУЛЯХ (канд. техн. наук, доц.)

И.В. ЕРЕМЕЕВ (канд. техн. наук, доц.)

А.К. СОКУР (канд. техн. наук, доц.)

А.Н. ИВАНЧЕНКО (асп.)

Национальный горный университет, г. Днепропетровск

ВИБРОУПЛОТНЕНИЕ КАК СПОСОБ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ НА ГРОХОТАХ

В статье 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 вязкоупругоупругое состояние, которое достигается при содержании твердого более 900 г/л, частоте и амплитуде колебаний сита, соответственно, 1500-2000 мин⁻¹ и 1,5-2,0 мм, при этом время виброуплотнения должно быть не менее 35 сек.

Ключевые слова: обезвоживание, угольный шлам, грохот, амплитуда колебаний

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 основное 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 водоотделительных 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 однозначнос-

ти зависимостей между реологическими параметрами материала и параметрами вибровозбуждения.

Согласно работам [9, 10], структуру угольного шлама на вибрирующей поверхности можно рассматривать как реологическую модель Бингама-Шведова [11]. Такие модели использованы в работах В.Г. Сансиева [12] и В.К. Гаруса [13] для разработки технологий тонкого грохочения угольного илосодержащего шлама.

Теоретические и экспериментальные исследования [14, 15] 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 [14] 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; τ_c - напряжение сдвига материала слоя; η - эффективная вязкость; ω - частота колебаний; a - амплитуда колебаний; k - постоянный коэффициент.

Как видно из выражения (1) скорость уплотнения слоя зависит от текущей высоты слоя h , напряжения сдвига материала слоя τ_c , эффективной вязкости η , а также от частоты ω 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 [3,19].

Подобные зависимости могут быть хорошо аппроксимированы выражениями [20]:

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

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

где η_o и τ_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 η_o , τ_o , h_1 и h_2 .

Известно также [20-22], что эффективная вязкость дисперсной среды существенно зависит от динамических параметров рабочей поверхности, т.е. $\eta = \eta(a, \omega)$. Предлагаемые зависимости вибровязкости от частоты и амплитуды колебаний следующие: $\eta = \eta_o + k/\omega^3 a$ [4]; $\eta = \eta_o + \alpha/u$, $\eta = \eta_o \exp(\alpha/u)$ [21]; $\eta = \eta_o + (\tau - \tau_c)/(1 + \alpha u) \dot{\epsilon}$ [22] и т.д., где η_o - вязкость предельно разрушенной дисперсной структуры; α , 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 соответствие с результатами испытаний материалов, приведенными в работах [3, 19-22]: $\tau_o = 10 \text{ Н/м}^2$, $k = 10^6 \text{ Н/м} \cdot \text{с}^2$, $\eta_o = 10^3 \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$,

$\tilde{h}_1 = \tilde{h}_2 = 0,1$ 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^{-1} (рис. 1). 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^{-1} 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.

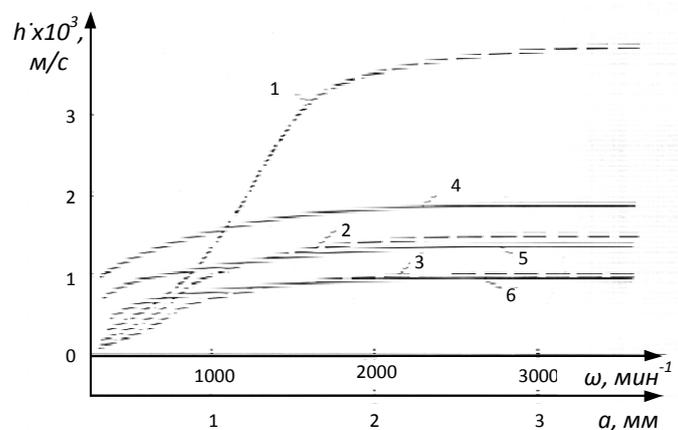


Рис. 1. Графики влияния амплитуды и частоты колебаний рабочей поверхности на скорость процесса уплотнения материала:

1, 2, 3 - $f(\omega)$ при $a = 1$ мм; 4, 5, 6 - $f(a)$ при $\omega = 750$ мин^{-1} .

Высота слоя: 1, 4 - $h = 0,1$; 2, 5 - $h = 0,05$; 3, 6 - $h = 0,025$ мм

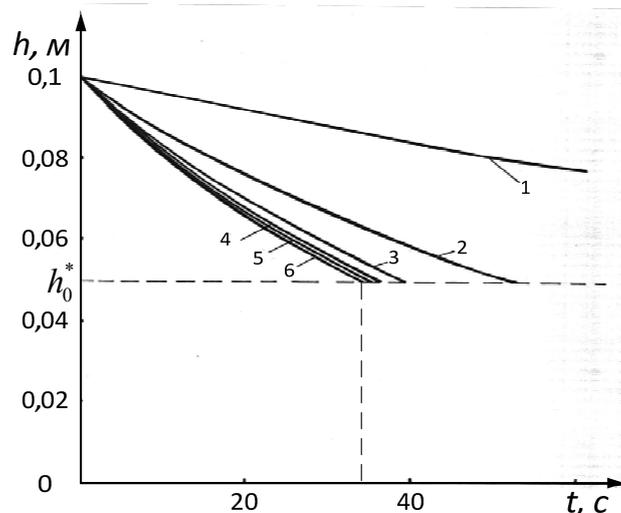


Рис. 2. Кривые кинетики уплотнения слоя модельного материала при амплитуде колебаний рабочей поверхности 2 мм и частотах:

1 - 500 мин^{-1} ; 2 - 1000 мин^{-1} ; 3 - 1500 мин^{-1} ; 4 - 2000 мин^{-1} ; 5 - 2500 мин^{-1} ; 6 - 3000 мин^{-1}

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

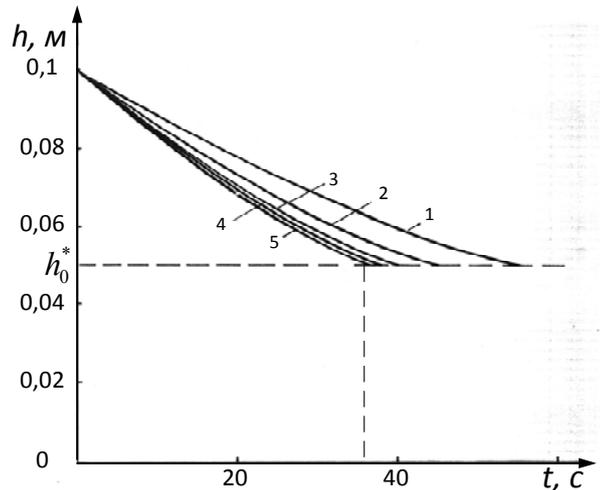


Рис. 3. Кинетические кривые при $\omega = 1500$ мин⁻¹ и амплитудах:
1 – 0,5 мм; 2 – 1,5 мм; 3 – 2,5 мм; 4 – 3,5 мм; 5 – 4,0 мм

Из рис. 4 следует, что имеются три характерных области обезвоживания, на которых зависимости $\tau_{\dot{\gamma}} = f(\varepsilon Re)$ имеют прямолинейный характер, но различные углы наклона. Эти области можно характеризовать значениями $\varepsilon Re > 1$, $\varepsilon Re < 1$ и $\varepsilon Re \ll 1$, 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/м², потом при переходе на уровень $\varepsilon Re < 1$ оно делает скачек в 2 раза с 35 Н/м² до 70 Н/м² и растет плавно до 95 Н/м², потом делает второй скачек с 95 Н/м² до 110 Н/м² и далее медленно, но прямолинейно увеличивается до 120 Н/м² 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, $\varepsilon Re > 1, \varepsilon Re < 1, \varepsilon Re \ll 1$.

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.⁻¹ и 1,5-2,0 мм, при этом время виброуплотнения должно быть не менее 35 с.

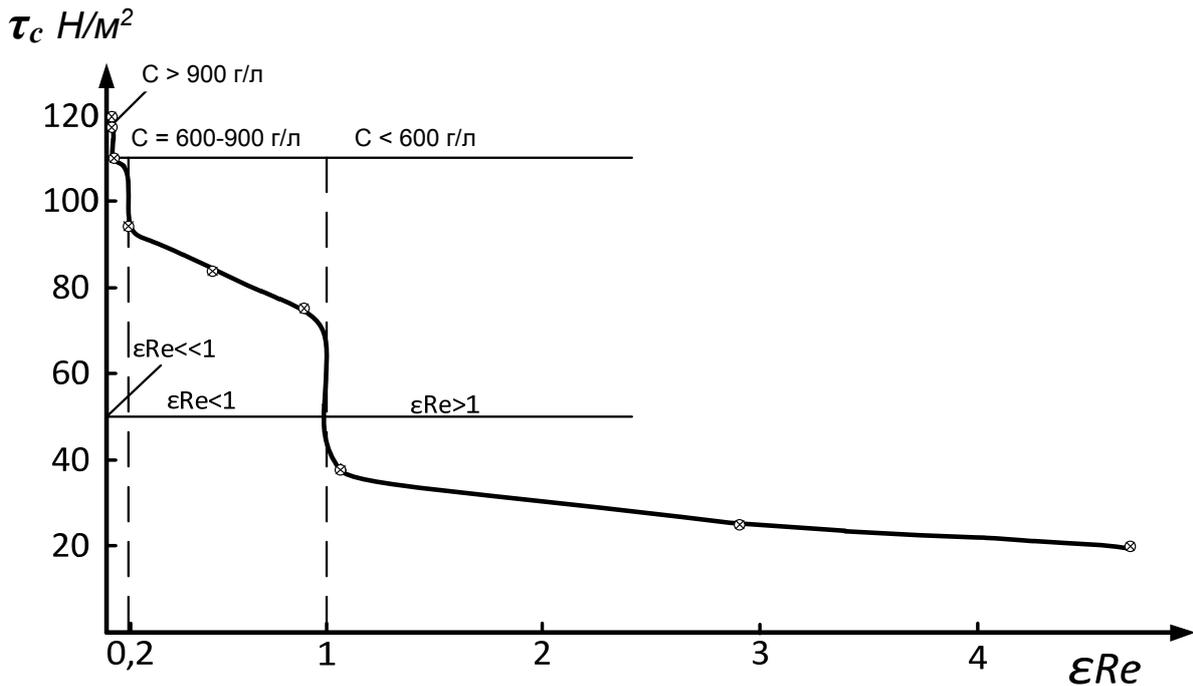


Рис. 4. Влияние реологических констант ϵRe на напряжение сдвига τ_c при обезвоживании угольного шлама нефлотационной крупности на высокочастотном грохоте с разнонаклонными участками рабочей поверхности

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⁻¹, 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.

Список использованной литературы

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 / 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 илосодержащего 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.
10. Рейнер М. Деформация и течение. Введение в реологию / М. Рейнер. – М.: Гостоптехиздат, 1963. – 382 с.
11. Гончаревич И.Ф. Теория вибрационной техники и технологии / И.Ф. Гончаревич, К.Ф. Фролов. – М.: Стройиздат, 1972. – 104 с.
12. Сансиев В.Г. Обоснование параметров и разработка грохотов с непосредственным возбуждением сит: Дис. канд. техн. наук / В.Г. Сансиев. – Днепропетровск: ИГТМ АН Украины, 1985. – 225 с.
13. Гарус В.К. Совершенствование технологии тонкого грохочения илосодержащих угольных шламов Западного Донбасса: Дис. канд. техн. наук / В.К. Гарус. – Днепропетровск: НГАУ, 2004. – 129 с.
14. Полулях А.Д. Изменение структурно-механических свойств угольного шлама в процессе обезвоживания на сите грохота / А.Д. Полулях, И.В. Еремеев // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2013. – Вип. 52(93). – С. 96-106.
15. Полулях А.Д. Исследование процесса обезвоживания угольных шламов на лабораторной модели высокочастотного грохота с разнонаклонными участками сит / А.Д. Полулях, Д.А. Полулях, И.В. Еремеев // Материалы XVI международной научно-практической конференции по обогащению полезных ископаемых. – Бердянск: Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2013. – Вип. 53(94). – С. 138-148.
16. Надутый В.П. Исследование кинетики обезвоживания при вибрационном грохочении / В.П. Надутый, Е.С. Лапшин, А.И. Шевченко // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2012. – Вип. 49(90). – С. 112-119.
17. Шевченко Г.А. Развитие научных основ процессов вибрационного перемещения и разделения минерального сырья в жидкости на колеблющейся поверхности: Дис. докт. техн. наук / Г.А. Шевченко. – Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины, 2011. – 523 с.
18. Полулях А.Д. Определение условий перехода вязкой суспензии в вязкопластичный материал на сите виброгрохота / А.Д. Полулях, И.В. Еремеев // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2012. – Вип. 51(92). – 74-82.
19. Полулях А.Д. Экспериментальные исследования деформационных свойств павлоградских концентрированных шламов / А.Д. Полулях, В.Г. Сансиев, В.К. Гарус // Обогащение полезных ископаемых: Науч.-техн. сб. – 2004. – Вып. 19(60). – С. 97-107.
20. Пальмов В.А. Колебание упруго-пластических тел / В.А. Пальмов. – М.: Наука. – 1976. – 328 с.
21. Руденко И.Ф. Формирование изделий поверхностью виброустройствами / И.Ф. Руденко. – М.: Стройиздат, 1971. – 104 с.
22. Куннос Г.Я. Вибрационная технология бетона / Г.Я. Куннос. – Л.: Стройиздат, 1967. – 168 с.

Надійшла до редакції 20.03.2014

Д.О. Полулях, І.В. Єремєєв, А.К. Сокур, А.М. Іванченко

У статті виконано визначення параметрів віброущільнення вугільного шламу при зневодненні на високочастотному гуркоті з різнопохилі ділянками робочої поверхні. Встановлено, що віброущільнення в шарі вугільного шламу нефлотатійної крупності на обезводненій поверхні виброгрохота визначається його переходом з в'язкопластичного у в'язкопружно - пластичне стан, який досягається при вмісті твердого понад 900 г / л, частоті і амплітуді коливань сита, відповідно, 1500-2000 хв⁻¹ і 1,5-2,0 мм, при цьому час віброущільнення має бути не менше 35 сек.

Ключові слова: зневоднення, вугільний шлам, гуркіт, амплітуда коливань

D.O. Pullen, I.V. Ereemeev, A.K. SOKUR, A.M. Ivanchenko

The article holds characterization vibrocompaction coal slurry dewatering at SRI on the high-frequency rumble with raznolaklonnymi sites work surface. It was established that the carbon layer of vibration compaction in sludge dewatering neflotatsionnoy size on vibrating screen surface is determined by its transition from a viscoelastic, viscoplastic plastic state, which is achieved with a solids content of more than 900 g / l, the frequency and amplitude of vibration sieve, respectively, 1500-2000 min⁻¹ and 1.5-2.0 mm, the vibro- time must be at least 35 seconds.

Keywords: dehydration, coal slime, crashing, the oscillation amplitude