

- увеличивается гладкость бумаги, снижается её шероховатость, что естественно будет способствовать увеличению разрешающей способности бумаги и, как следствие, лучшему восприятию печатной краски, возможности печати цветных иллюстраций;

- показатель красковосприятости, Дотт – в пределах 1,42-1,44, что превышает существующую норму для бумаги офсетного способа печати на 10 – 15 %.

- показатель прочности поверхности к выщипыванию, определённый по методу Деннисона, также имеет стабильные значения в пределах 9 – 10.

Предварительные испытания использования лакированных волокон в качестве наполнителей показали перспективность их применения в композиции бумаги для печати. На испытанных образцах бумаги имело место улучшение таких свойств, как красковосприятие, прочность поверхности.

**Список литературы:** 1. Арсентьев В. А., Биленко Л. Ф., Вайсберг Л. А. Механическая активация сверхтонких порошков на вибрационной мельнице. Вестник НТУ «ХПИ». 2006. № 30. С. 53 – 63.

*Поступила в редколлегию 11.09.08*

УДК 622.742.002.5

**В.П. НАДУТЫЙ**, докт. техн. наук, ИГТМ НАН Украины

**Е.С. ЛАПШИН**, докт. техн. наук, ИГТМ НАН Украины

## **КИНЕТИКА ГРОХОЧЕНИЯ С ПЕРЕМЕННЫМ ВИБРОВОЗБУЖДЕНИЕМ ПО ДЛИНЕ ПРОСЕИВАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Запропоновано вібраційне просівання вологої сировини моделювати ймовірнісним процесом влучення частки в отвір сита й процесом коливання частки на капілярному містку. Отримано нелінійне диференціальне рівняння коливань частки. На основі чисельного рішення сформульована умова просівання частки через отвір сита, що дозволяє визначити необхідну амплітуду й частоту коливань.

It is offered to model vibration screening wet raw material a probabilistic process of hit of a corpuscle in a mesh and process of oscillation of a corpuscle on the capillary walkway. The nonlinear differential equation of oscillations of a corpuscle is gained. On the basis of a numerical solution the condition of screening of a corpuscle through a mesh which allows defining demanded amplitude and an oscillation frequency is formulated.

**Постановка проблемы.** Разделение сыпучего сырья по крупности неотъемлемая операция многих современных технологических процессов в горной, химической, металлургической и многих других отраслях. С этой целью используют вибрационные грохоты. Эффективности их работ существенно влияет на качество продукции, энерго- и ресурсосбережение. Отсюда пристальное внимание к совершенствованию процесса грохочения. В результате развития компьютерной техники выбор конструктивных и режимных параметров грохота рационально производить на основе численного моделирования, а не трудоемких и длительных натурных испытаний. Разработано большое количество как теоретических, так и эмпирических моделей, обзор которых приведен в монографии [1].

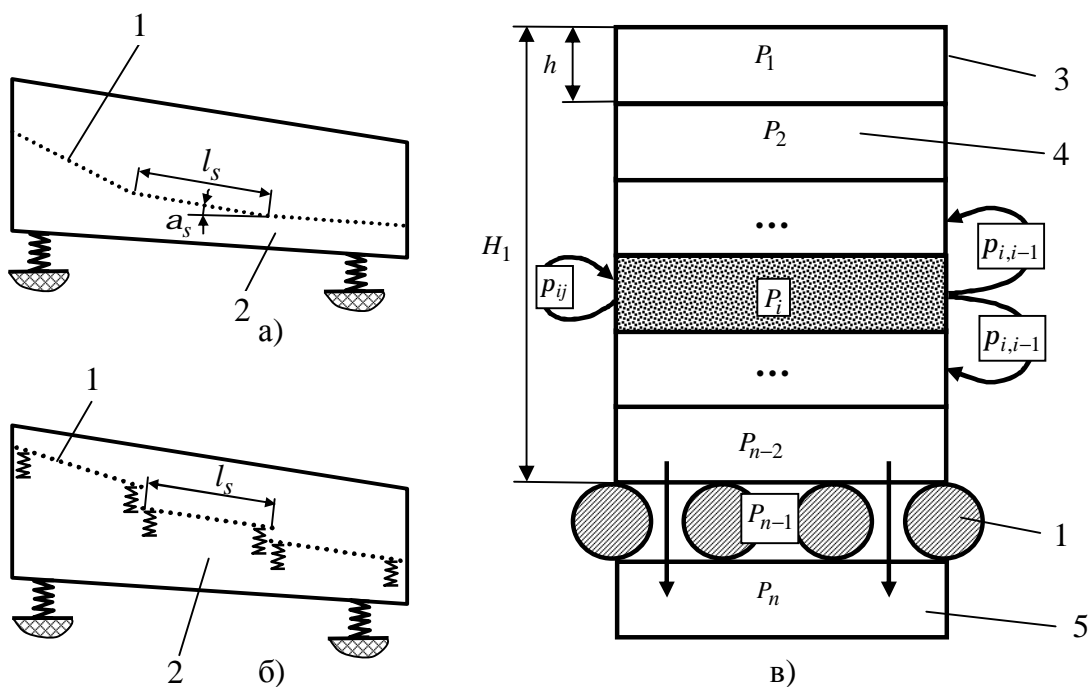
Для обеспечения высокой производительности сырья на просеивающую поверхность подают толстым слоем. В этом случае разделение по крупности происходит в результате таких взаимно обусловленных процессов, как сегрегация, просеивание и вибротранспортирование. Интенсивность этих составляющих зависит от грансостава, формы частиц, физико-механических свойств сырья, высоты слоя, конструктивных и динамических параметров грохота. Особо следует отметить, что в процессе грохочения изменяется высота слоя, а это существенно сказывается на всех трех составляющих. Высокопроизводительные грохоты имеют просеивающую поверхность, длина которой составляет 5 – 8 метров. При этом высота слоя в результате просеивания уменьшается в 3 – 10 раз. Отсюда невозможность обеспечения рационального вибровозбуждения сырья по всей длине просеивающей поверхности. Поэтому были предложены грохоты, у которых параметры вибровозбуждения меняются по длине просеивающей поверхности. Математическое моделирование кинетики грохочения для такого случая отсутствует, что сдерживает совершенствование процесса. В этой связи цель работы – математическое моделирование кинетики грохочения при изменяющихся по длине просеивающей поверхности параметрах вибровозбуждения.

**Математическая модель.** На рисунке изображены наиболее распространенные грохоты с переменными параметрами вибровозбуждения по дли-

не просеивающей поверхности.

На схеме:

а) отдельные участки 1 просеивающей поверхности, длина которых обозначена  $l_s$ , установлены под разными углами к горизонту  $a_s$  (индекс  $s$  указывает на порядковый номер участка). Несмотря на то, что короб 2 грохота колеблется с одинаковой амплитудой по ходу транспортирования сырья (вибровозбудитель условно не показан), нормальные и касательные составляющие виброускорения на участках  $s$  изменяются, поскольку меняется угол  $a_s$ .



Расчетная схема:

- а) – грохот с переменными углами наклона просеивающей поверхности;
- б) – грохот, у которого участки просеивающей поверхности имеют различное вибровозбуждение; в) – элементы расчетной схемы.

1 – участок просеивающей поверхности; 2 – короб; 3 – контрольный объем;  
 4 – элементарный слой; 5 – подрешетное пространство

На схеме:

б) каждому участку  $s$  сообщается колебания с различной амплитудой или частотой, возможны также и различные углы  $a_s$ .

Проведем две плоскости, перпендикулярные к первому участку ( $s=1$ ) просеивающей поверхности 1 (рис.), причем одну плоскость проведем через

начало участка, а вторую – на расстоянии  $l_K$  от нее. Часть объема грохотимого материала, ограниченного этими плоскостями, назовем контрольным объемом 3.

Начальная высота контрольного объема равна:

$$H_K^{(1)} = Q / 3600 r_H V_1^{(1)} b_c,$$

где  $Q$  – массовая производительность по питанию;  $r_H$  – насыпная плотность;  $V_1^{(1)}$  – скорость вибротранспортирования при высоте  $H_1^{(1)}$ ;  $b_c$  – ширина просеивающей поверхности. Здесь и далее верхний индекс в скобках указывает на то, что переменная относится к участку просеивающей поверхности с номером  $s$ .

Контрольный объем по высоте разделим на элементарные слои 4, каждому из которых присвоим индекс  $i$ . Их нумерацию ( $i = 1, 2, 3, \dots, n - 2$ ) выполним сверху вниз. Высота элементарного слоя равна  $h = H_1 / (n - 2)$ . Просеивающую поверхность 1 назовем слоем  $n - 1$ , а подрешетное пространство 5 – слоем  $n$ .

Распределение частиц подрешетного класса крупности  $d$  (мелкие частицы) по высоте контрольного объема будем характеризовать  $n$  – мерным вектором вероятности состояния  $\bar{P}(t)$ , компонентами которого являются вероятности  $P_i = M_i / M$ , где  $M_i$  и  $M$  – соответственно массы мелких частиц в  $i$ -ом слое и в контрольном объеме.

Непрерывное изменение высоты контрольного объема будем моделировать дискретным изменением с шагом, равным толщине элементарного слоя  $h$ . Договоримся нумерацию последующих элементарных слоев сохранять, а будем полагать, что поочередно удаляются слои 1, 2 и т. д. При этом высоту контрольного объема, скорость вибротранспортирования, количество шагов и время, через которое совершается последующий шаг, будем записывать с индексом  $m$ , равным номеру верхнего элементарного слоя, т. е.  $H_m^{(1)}$ ,  $V_m^{(1)}$ ,  $k_m^{(1)}$  и  $t_{n,m}^{(1)}$ . Вектор вероятности состояния и вероятности переходов для  $H_m^{(1)}$  обозначим так:  $\bar{P}^{(1)}(k, m)$  и  $p_m^{(1)}(m)$ .

Под действием вибрации частицы с вероятностью  $p_{ij}^{(1)}$  переходят из элементарного слоя  $i$  в слой  $j$ . Переход совершается за время  $t_n^{(1)}$ , кратное периоду колебаний. Это событие назовем шагом  $k$ . Предположим, что вероятность перехода на шаге  $k$  не зависит от ее значения на шаге  $k-1$ . При таких допущениях грохочение является дискретным марковским процессом с дискретными состояниями (цепь Маркова). Распределение частиц на  $k$ -ом шаге описывается выражениями [1 – 3]

$$\left. \begin{aligned} H_m^{(1)} &= H_1^{(1)} - (m^{(1)} - 1)h; \\ \bar{P}^{(1)}(k_m^{(1)}, m^{(1)}) &= \bar{P}^{(1)}(0, m^{(1)}) \left\| p_{ij}^{(1)}(m^{(1)}) \right\|^{k_m^{(1)}}; \\ t^{(1)} &= \sum_{f=1}^{m^{(1)}} t_{n,f}^{(1)} k_f^{(1)}; \\ L_k^{(1)} &= \sum_{f=1}^{m^{(1)}} V_f^{(1)} t_{n,f}^{(1)}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $\bar{P}^{(1)}(0, m)$  – вектор-строка вероятности начального состояния;  $\left\| p_{ij}^{(1)} \right\|$  – стохастическая матрица размера  $n \times n$ ;  $t^{(1)}$  – время;  $L_k^{(1)}$  – путь, пройденный контрольным объемом. Элементы предпоследней строки  $p_{n-1,n}^{(1)}$ ;  $p_{n-1,n-1}^{(1)}$  и  $p_{n-1,n-2}^{(1)}$  соответственно характеризуют вероятности прохождения, забивания и самоочистки просеивающей поверхности с возвратом мелких частиц в слой грохотимого материала.

Вероятности переходов  $p_{ij}^{(s)}$  и скорость вибротранспортирования  $V_m^{(s)}$  для заданной амплитуды и частоты вибровозбуждения вычисляются по зависимостям, приведенным в работах [1 – 4]. Для определения вероятностей просеивания частиц различной формы разработан аналитический и численный метод [1, 5].

После прохождения контрольным объемом пути  $L_k^{(1)} = l_1$  он перейдет на второй участок  $s = 2$  просеивающей поверхности, у которого свои параметры

вибровозбуждения, поэтому

$$\left. \begin{aligned} H_m^{(2)} &= H_m^{(1)} - (m^{(2)} - 1)h; \\ \bar{P}^{(2)}(k_m^{(2)}, m^{(2)}) &= \bar{P}^{(1)}(k_m^{(1)}, m^{(1)}) \parallel p_{ij}^{(2)}(m^{(2)}) \parallel^{k_m^{(2)}}; \\ t^{(2)} &= \sum_{f=1}^{m^{(2)}} t_{n,f}^{(2)} k_f^{(2)}; \\ L_k^{(2)} &= \sum_{f=1}^{m^{(2)}} V_f^{(2)} t_{n,f}^{(2)}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Здесь учтено, что конечное значение вектора вероятностей состояния на участке 1 является начальным значением для участка 2.

Аналогично имеем для участка  $s$

$$\left. \begin{aligned} H_m^{(s)} &= H_m^{(s-1)} - (m^{(s)} - 1)h; \\ \bar{P}^{(s)}(k_m^{(s)}, m^{(s)}) &= \bar{P}^{(s-1)}(k_m^{(s-1)}, m^{(s-1)}) \parallel p_{ij}^{(s)}(m^{(s)}) \parallel^{k_m^{(s)}}; \\ t^{(s)} &= \sum_{f=1}^{m^{(s)}} t_{n,f}^{(s)} k_f^{(s)}; \\ L_k^{(s)} &= \sum_{f=1}^{m^{(s)}} V_f^{(s)} t_{n,f}^{(s)}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

На основе полученных зависимостей (1) – (3) разработана программа «Кинетика», которая позволяет численно исследовать кинетику грохочения.

Процесс грохочения существенно зависит от интенсивности сегрегации. Для анализа организации процесса грохочения предложено использовать такую характеристику марковской цепи, как поток вероятности  $Q_v = P_i p_{ij}$  перехода из состояния  $i$  в  $j$  [1, 6]. Если сегрегация недостаточно интенсивна, то падает производительность за счет дефицита мелких частиц в контактном слое. Когда же сегрегация излишне интенсивна, возникает конкуренция частиц для просеивания, что так же приводит к снижению производительности.

сти [1, 6]. При согласованных потоках сегрегации и просеивания, сколько частиц просеялось, столько их и поступило из верхних элементарных слоев в контактный слой.

Критерием рационального вибровозбуждения просеивающей поверхности, при котором достигается максимальное извлечение за минимальное время, является равенство нулю разности между входящим и выходящими из контактного слоя потоков вероятностей при максимальном потоке вероятностей просеивания [1, 6]. Согласование потоков вероятностей следует выполнять для каждого участка просеивающей поверхности, что достигается путем задания амплитуды, частоты и угла наклона.

### **Выводы:**

1. При грохочении изменение высоты слоя в результате просеивания влияет на интенсивность сегрегации, просеивания и вибротранспортирования.

2. Для достижения высокой эффективности грохочения и производительности вибровозбуждение просеивающая поверхность по ходу движения сырья должно изменяться с учетом уменьшения высоты слоя сырья.

3. Кинетика грохочения моделируется марковской цепью. Это позволяет описать кинетику с учетом влияния закономерностей сегрегации, просеивания и вибротранспортирования.

4. Рациональная организация процесса грохочения достигается за счет согласования потоков вероятностей, обусловленных сегрегацией и просеиванием.

На основе полученных результатов планируется создание метода оптимизации процесса грохочения и алгоритма автоматизированного управления работой вибрационного грохота.

**Список литературы:** 1. *Надутый В.П., Лапшин Е.С.* Вероятностные процессы вибрационной классификации минерального сырья. – Киев: Наукова думка, 2005. – 180 с. 2. *Лапшин Е.С.* Математическое моделирование процесса грохочения с использованием цепи Маркова // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. НГА України. – Дніпропетровськ, 1999. – № 5(46). – С. 30 – 34. 3. *Надутый В.П., Лапшин Е.С.* Идентификация процесса вибрационного грохочения с учетом сегрегации, просеивания и вибротранспортирования // Сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. "Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности". – Екатеринбург, 2002. – С. 76 – 80. 4. *Надутый В.П., Лапшин Е.С.* Кинематика сыпучей среды при вибрационном грохочении // Вибрации в технике и технологиях: Всеукр. начн.-техн. журн. – Винница, 2003. – № 5(31). – С. 51 – 54. 5. *Лапшин Е.С.* Определение вероятности вибрационного просеивания случайно ориентированной в пространстве частицы // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. НГА



України. – Дніпропетровськ, 2000. – № 10(51). – С. 47 – 52. 6. *Латишин Е.С.* Вероятностный критерий согласования процессов сегрегации и просеивания при вибрационном грохочении // Вибрации в технике и технологиях: Всеукр. начн.-техн. журн. – Винница, 2002. – № 1(22). – С. 36 – 38.

*Поступила в редколлегию 18. 06. 08*

УДК 622.734:621.926.3-9

***В.П. НАДУТЫЙ***, докт. техн. наук, ИГТМ НАН Украины  
***В.В. СУХАРЕВ***, аспирант, ИГТМ НАН Украины

## **ВЛИЯНИЕ РЕЖИМНЫХ, КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ПРОЧНОСТИ ИЗМЕЛЬЧАЕМОЙ ГОРНОЙ МАССЫ НА ТЕХНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ВНУТРИВАЛКОВОЙ КОНУСНОЙ МЕЛЬНИЦЫ**

Експериментально встановлені залежності продуктивності й енергоємності процесу мілкого та тонкого подрібнювання на внутрішньовалковому конусному млині від обертів приводу, зазору розвантажувальної щілини і міцності гірської маси, що подрібнюється.

Relations of productivity both energy output of process grind and fine grinding on of a roll conical grinding mill from revolutions of the arbor, width of a unloading backlash and strength of durability of rocks are established experimentally.

Измельчительные процессы отличаются большой энергоемкостью, поэтому поиски технических решений по ее уменьшению являются актуальными. Разработанная конструкция внутривалковой конусной мельницы отличается от обычных валковых реализуемым механизмом разрушения измельчаемой горной массы. При обычном ее раздавливании на валковых мельницах требуются значительные усилия для преодоления прочности горной массы, что влечет за собой большое энергопотребление, запасы прочностей рабочих органов (металлоемкость). Известно, что разрушение пород горной массы деформацией сдвига в три и более раз требует меньших усилий, поэтому совмещение деформации сжатия с деформацией сдвига при разрушении в процессе измельчения является перспективным при создании новых конструкций валковых мельниц.