

толщины стенок, длины и нагрузки.

Приведение формулы, определяющей зависимости частоты от параметров штанги, к безразмерному виду позволило сгруппировать эти параметры в комплексы, сократив число переменных с пяти до двух, и тем самым существенно упростить исследование полученной зависимости.

Анализ зависимости частот поперечных колебаний буровой штанги от нагрузки показал, что существенную роль в поперечных колебаниях играет первая гармоника. Частоты последующих гармоник значительно выше, но мало зависят от нагрузки.

Задача дальнейших исследований заключается в реализации части II поставленной в начале данной статьи - осуществить математическое моделирование амплитуд вынужденных поперечных колебаний буровой штанги.

#### Список литературы

1. **Остроушко И. А.** Бурение твердых горных пород. М.: Недра, 1966.– 291с.
3. **Сароян А. Е.** Бурильные колонны в глубоком бурении. М.: Недра, 1979.– 315с.
3. **Симонов В.В., Юнин Е.К.** Влияние колебательных процессов на работу бурильного инструмента. - М.: Недра, 1977. – 212с.
4. **Громадский А.С., Громадский В.А., Кузьменко Д.И.** Исследование влияния вибрации на оператора и на надежность работы станков шарошечного бурения / Вісник Криворізького технічного університету. – 2010.- № 25.- С. 191-195.
5. **Оробей В.Ф., Сурьянинов Н.Г.** / Основные положения численно-аналитического варианта МГЭ. — Труды Санкт-Петербургского политехнического ун-та. // Инженерно-строительный журнал. № 4(22). — СПб, 2011. — с. 33-39.
6. **Тимошенко С.П., Янг Д.Х., Уивер У.** Колебания в инженерном деле. М.: Машиностроение, 1985.– 472с.
7. **Бешта А.С., Хилов В.С., Плахотник В.В.** Математическая модель продольных и крутильных колебаний буровой штанги / Горная механика и автоматика. - Сборник научных работ. 2004. - Вып. 73.
8. **Тихонов А.Н., Самарский А.А.** Уравнения математической физики. М.: Наука, 1972.–435с.

Рукопись поступила в редакцию 02.04.13

УДК 622.732: 621.926

Ю.А. МАЛИНОВСКИЙ, С.И. МАЛИНОВСКАЯ, кандидаты техн., наук, доц.,  
А.А. БОНДАРЕЦ, А.Ю. МАЛИНОВСКАЯ, старшие преподаватели  
Криворожский национальный университет

### К ВОПРОСУ ОБ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ДРОБЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА В КОНУСНОЙ ДРОБИЛКЕ

Для повышения производительности и уменьшения крупности готового продукта для конусных дробилок мелкого и среднего дробления предложено интенсифицировать рабочий процесс за счет применения дополнительных вибраторов. Процесс выпуска готового материала из дробилки представлен как процесс вибрационного перемещения. Приведены расчетные зависимости для определения усилия дробления и скорости перемещения готового продукта в модифицированной дробилке.

На практике существует потребность в уменьшении крупности готового продукта и повышении производительности дробилок. Это, прежде всего, относится к дробилкам тонкого дробления.

Одним из путей решения этой технической задачи является внедрение на ГОКах дополнительных участков сверхтонкого дробления с использованием эксцентриковых или вибрационных дробилок. Для чего требуется дополнительные затраты на приобретение нового оборудования и строительство нового корпуса сверхтонкого дробления, а внедрение вибрационных дробилок (например, разработки института «Механобр», г. Санкт-Петербург), еще и требует доводки в промышленных условиях.

В данном предложении хотим реализовать идею повышения эффективности работы конусных дробилок (например, мелкого и среднего дробления) за счет одновременной реализации в одной существующей измельчительной машине (в условиях ГОКов) двух принципов дробления: *a* - принципа эксцентрикового дробления; *b* - принципа вибрационного дробления.

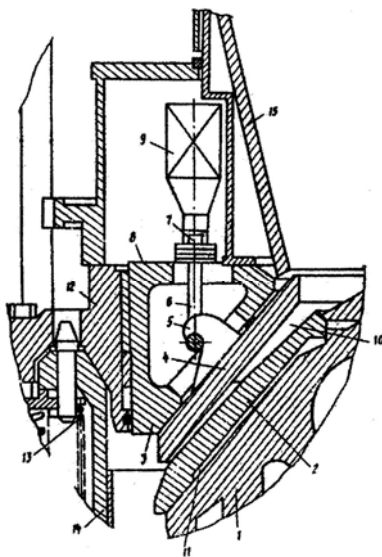
Причем, эти принципы используются одновременно в одной рабочей камере, образованной подвижным и неподвижным конусами.

К подвижному конусу и разрушаемому материалу энергия подводится в результате несоосного вращения подвижного конуса, а к неподвижной броне передается вибрационная составляющая усилия дробления по аналогии с работой [1].

Подвести дополнительную энергию в зону дробления можно путем установки в «окна» неподвижного конуса четырех вибраторов (рис. 1), которые через технологические болты удерживают неподвижную броню и передают на нее вибрационную нагрузку.

При правильном выборе вибраторов по мощности, частоте и фазе поступления ударных импульсов, составляющие усилия от несоосного вращения вала конуса и от поступления ударных импульсов (от четырех вибраторов, в местах их установки) должны геометрически складываться.

Ударную нагрузку от вибраторов можно условно разложить на направление действия усилия дробления  $P_{др}$  (перпендикулярно образующей конуса) и направление образующей боковой поверхности подвижного конуса (рис. 2).



**Рис. 1.** Схема установки дополнительных вибраторов на корпусе конусной дробилки. 1 - дробящий конус; 2 - броня подвижного конуса; 3 - неподвижный конус; 4 - броня неподвижного конуса; 5 - крюки неподвижной брони; 6 - стяжные болты неподвижной брони; 7 - гайки; 8 - переключка неподвижного конуса; 9 - вибратор

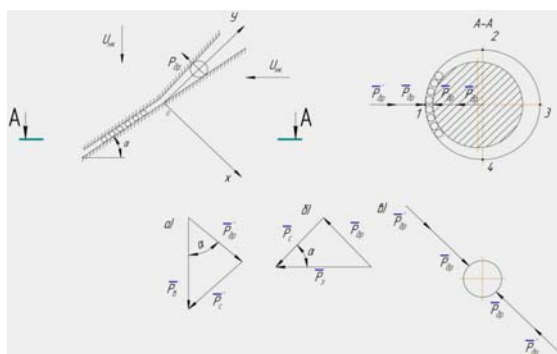
Импульсное воздействие на обрабатываемый материал по направлению действия усилия дробления  $P_{др}$  способствует более полному разрушению материала в камере дробления, а импульсное воздействие, направленное по образующей подвижного конуса, приводит к более полной и быстрой очистке камеры дробления от измельчаемого материала.

Таким образом, применение вибрационного дробления приведет к более тонкому и полному измельчению материала и более быстрому очищению камеры дробления (то есть повышению производительности машины и снижению крупности готового продукта).

Для определения вибрационного усилия дробления и силы скатывания составим векторный треугольник сил, связывающий вибрационную нагрузку от вибратора  $\vec{P}_v$ , вибрационное усилие дробления  $\vec{P}'_{др}$  и вибрационную составляющую усилия скатывания измельченного материала по конусу  $\vec{P}'_c$ .

Векторный треугольник (рис. 2, сх. а) иллюстрирует равновесие дробимого тела под действием усилия  $\vec{P}_v$  одного из четырех вибраторов, размещенных на корпусе неподвижного конуса, которые передают вибрационную нагрузку через крюки на броню неподвижного конуса. При работе конусной дробилки с дополнительным вибрационным возбуждением неподвижной брони важным является вопрос согласования движения конуса и вибратора.

Вибратор №1 передает (рис. 2) ударный импульс неподвижной броне, если угол поворота конуса от горизонтали  $\varphi_1=0$ .



**Рис. 2.** Формирование усилий разрушения: а - при вибрационном дроблении; б - при сближении конусов (с помощью эксцентрика, связанного с подвижным конусом); в - приложение разрушающих усилий к дробимому телу

Вибратор №2 передает ударный импульс броне, если  $\varphi_1=\pi/2$ .

Вибраторы №3 и №4 передают ударные импульсы броне, если углы поворота конуса соответственно равны  $\pi$  и  $3/4\pi$ . При этом, во время совершения очередного ударного импульса каждым из вибраторов, подвижный конус будет находиться под соответствующим вибратором на минимальном технологическом расстоянии. Если угол поворота конуса будет равен  $\varphi_1=2\pi$  ( $\varphi_1=0$ ), то вибратор №1 снова передаст ударный импульс

неподвижной броне и так далее, т.е. при прохождении конуса под каждым вибратором от конуса и вибратора должны исходить накладывающиеся ударные импульсы (такая синхронизация называется следящей).

Кроме того, движение конуса дробилки и вибраторов могут быть синхронизированы за счет того, что при совместной работе всех вибраторов измельчаемая масса будет получать ударные импульсы тогда, когда мгновенная камера дробления будет находиться в положении 1-4 (рис. 2) и в соответствии с терминологией [2] такая синхронизация называется кратной.

Если  $\omega$  - частота вращения эксцентрика (вала конуса), а  $p$  - частота - частота колебаний вибратора, то  $p = \omega/4$ .

Способ получения эффекта синхронизации для рассматриваемых объектов может быть технически реализован по одному из трех возможных путей:

Принудительная механическая синхронизация (при помощи специальных валов, шестерен или цепной передачи).

Электрическая синхронизация (при помощи системы «Электрического вала» или системы «Синхронных электродвигателей»).

Самосинхронизация; здесь синхронность и требуемая фазировка достигается благодаря вибрациям системы тел, на которых установлены вибраторы (использование эффекта самосинхронизации позволяет как усовершенствовать привод существующих машин, так и создать принципиально новые машины и установки).

В работе [3] высказана гипотеза о том, что процесс выпуска измельченного материала из рабочей камеры дробилки является процессом вибрационного перемещения, при этом вибрационная составляющая, сталкивающая разрушенную породу  $P_c$  прямо пропорциональна производительности машины (см. рис. 2, точка 3) и равна

$$P_c = P_{\text{зо}} \cos \alpha (1 - \cos \omega t), \quad (1)$$

где  $P_{\text{зо}}$  - наибольшее мгновенное усилие на эксцентрик;  $P_s$  - усилие, развиваемое на эксцентрик, обусловленное несоосностью при вращении эксцентрика и подвижного конуса.

Учитывая тот факт, что дробилка дополнительно укомплектована еще и четырьмя вибраторами при расположении конусов дробилки в положении 3, значительная часть измельченного материала получит дополнительный «верхний» ударный импульс, который также будет способствовать освобождению пространства между конусами от измельчаемого материала. Таким образом, под воздействием колеблющейся неподвижной брони, измельчаемый материал получит дополнительное вибрационное перемещение под действием усилия  $P'_c$ , которое способствует повышению производительности конусных дробилок.

Усилие  $P'_c$  определяем следующим образом

$$P'_c = P_b \sin \alpha \cdot \sin pt = P_b \sin \alpha \cdot \sin(\omega/4)t, \quad (2)$$

где  $P_b$  - усилие развиваемое каждым вибратором.

Суммарное усилие скатывания при расположении дробящих конусов, согласно рис. 2, точка 3 определится сложением усилий по формулам (1) и (2).

Помимо усилий скатывания при выпуске руды из рабочей зоны дробилки составим выражения для усилий дробления, вызванных несоосностью эксцентрика и дробящего конуса, а также ударными импульсами, воспринимаемыми неподвижной броней

$$P_{\text{др}} = P_{\text{зо}} \sin \alpha (1 - \cos \omega t) \quad (3)$$

$$P'_{\text{др}} = P_b \cos \alpha \cdot \sin pt \quad (4)$$

Суммарное усилие дробления при расположении дробящих конусов, согласно рис. 2, точка 1, определится сложением усилий по формулам (3), (4).

В данной работе процесс дробления руды интенсифицирован за счет подведения к неподвижному конусу вибрационных нагрузок, при этом процесс выпуска измельченной руды из камеры дробления, с учетом вибраций, можно представить как процесс вибрационного перемещения по образующим подвижного конуса. В отличие от работы [2], где выпуск руды осуществляется по плоскости, рассматриваем вибрационное перемещение материала по некоторой узкой полоске, наклоненной под углом  $\alpha$  к колеблющейся плоскости ( $\alpha$  - угол наклона образующих подвижного конуса).

При этом средняя скорость вибрационного перемещения подготовленного материала [2] определится

$$V_{cp} = (4/\pi)A\omega\left(1 - \frac{1}{\omega_0}\right)\left(1 - \frac{1}{\omega_0^2}\right)\cos\beta, \quad (5)$$

где  $A$  - амплитуда колебаний вибрирующей полоски или плоскости, зависит от параметров вибровозбудителя;  $\omega$  - угловая скорость вращения ротора дробилки или вибратора;  $\omega_0$  - параметр вибрации плоскости или полоски ( $\omega_0 = A\omega^2 \sin\beta/q\cos\alpha$ );  $\beta$  - направление вибрации,  $q$  - ускорение свободного падения.

Для вибрационного перемещения материала по узкой полоске (плоскости), наклоненной под углом  $\alpha$  к горизонту ( $\alpha$  - угол наклона образующих подвижного конуса к горизонту), используем терминологию и обозначения, принятые в работе [2].

Рассмотрим законы движения частицы и ее среднюю скорость для дробилки с вращающимся подвижным конусом и вибрирующим неподвижным.

Формулы для ускорения  $\ddot{x}(t)$  и перемещение частицы руды  $x(t)$  рассмотрим для двух частных случаев:

качания подвижного конуса при непрерывном вращении эксцентрика (в этом случае  $\beta = -\alpha$ );

колебаний неподвижного конуса (его брони) от четырех вибраторов, установленных в корпусе неподвижного конуса (в этом случае  $\beta = \pi/2 - \alpha$ ).

Для первого случая уравнение движения, закон перемещения и среднюю скорость частицы представим в виде

$$\ddot{x} = -g \frac{\sin(\alpha+\rho)}{\cos\rho} + A\omega^2 \frac{\cos(\alpha+\rho)}{\cos\rho} \sin\omega t, \quad (6)$$

$$x(t) = -g \frac{\sin(\alpha+\rho)}{2\cos\rho} (t - t^*)^2 + \frac{A\omega \cos(\alpha+\rho)}{\cos\rho} (t - t^*) - \frac{A\cos(\alpha+\rho)}{\cos\rho} (\sin\omega t - \sin\omega t^*) \quad (7)$$

$$V_{cp} = \frac{4}{\pi} \omega A \left(1 + \frac{\cos\alpha}{A\omega^2 \sin\alpha}\right) \left(1 + \frac{\cos^2\alpha}{A^2\omega^4 \sin^2\alpha}\right), \quad (8)$$

где  $t^*$  - момент времени, для которого перемещающаяся частица находится в начале координат, исходя из начальных условий  $\dot{x}(t^*) = \dot{x}^*$ ;  $x(t^*) = 0$ ;  $A = e/\cos\alpha$  - амплитуда качаний подвижного конуса;  $e$  - эксцентриситет подвижного конуса (или эксцентрика);  $\rho = \arctg f$  - угол трения скольжения;  $f$  - коэффициент трения скольжения измельчаемого материала по броне конуса.

Для второго случая уравнение колебаний, закон перемещения и среднюю скорость частицы (на подвижном конусе) запишем следующим образом

$$\ddot{x} = -g \frac{\sin(\alpha+\rho)}{\cos\rho} + Bp^2 \frac{\sin(\alpha+\rho)}{\cos\rho} \sin pt, \quad (9)$$

$$x(t) = -g \frac{\sin(\alpha+\rho)}{2\cos\rho} (t - t^*)^2 + B \frac{p \sin(\alpha+\rho)}{\cos\rho} (t - t^*) - \frac{B \sin(\alpha+\rho)}{\cos\rho} (\sin pt - \sin pt^*) + \dot{x}^* (t - t^*), \quad (10)$$

$$V_{cp} = \frac{4}{\pi} B p (1 - g/Bp^2) (1 + g^2/B^2p^4) \quad (11)$$

где  $B$  - амплитуда колебаний, создаваемых вибровозбудителем (например, дебалансным).

В стандартной конусной дробилке рабочий процесс осуществляется за счет эксцентричного вращения конуса и на этот процесс дополнительно накладываются вынужденные колебания от четырех вибровозбудителей, установленных на корпусе неподвижного конуса.

Вибрации передаются через соединительные тяги (болты) на неподвижную броню с частотой колебаний  $p$ . При вращении конуса с угловой частотой  $\omega$  и колебаниях неподвижной брони с синхронизирующей частотой  $p$ , суммарное перемещение частиц при их выгрузке из камеры дробления необходимо определить как суперпозицию решений (7), (10) для  $x(t)$ ,  $\dot{x}(t)$ .

Среднюю скорость перемещения материала в дробилке при интенсификации процесса дробления получим путем суммирования решений (8), (11) для  $V_{cp}$  и  $\dot{V}_{cp}$ .

Таким образом, суммарное усилие дробления и суммарная скорость перемещения измельчаемого материала при соответствующем выборе параметров вибрации ( $B, P$ ) могут значительно возрасти, что в конечном счете может привести к увеличению производительности машины на 20-25% и снижению крупности готового продукта, например, для широко применяемых на практике дробилок КМД 2200Т до значений 10-12 мм.

#### Список литературы

1. А.С. СССР кл. В02.с 2/4 №674785. Конусная дробилка / **Бондарец А.И., Зверховский Я.Я.** Криворожский горнорудный институт, заявлено 10.01.78, опубл. 25.07.79.
2. **И.И. Блехман, Г.Ю. Джанелидзе.** Вибрационное перемещение. М., Наука, 1964. - С. 90-112.
3. **И.И. Блехман, Н.А. Иванов** Движение материала в камере дробления конусных дробилок как процесс вибрационного перемещения / Обогащение руд, №1,1977. - С. 15-21.

Рукопись поступила в редакцию 02.10.13