

УДК 621.926.3(2)

Н.А.ДАЦ, аспирант, С.В.ШВЕД, канд. техн. наук, доцент,
Д.В.ПОПОЛОВ, канд. техн. наук, доцент
гвуз «криворожский национальный университет»

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ВИБРАЦИОННЫХ КОНУСНЫХ ДРОБИЛОК

Проведено концептуальний аналіз роботи вібраційної дробарки. Отримана фізико-механічна модель дозволяє провести розрахунок такого обладнання при його проектуванні для заданих умов, з метою зменшення енерговитрат при забезпеченні високої якості кінцевого продукту.

Произведен концептуальный анализ работы вибрационной дробилки. Полученная физико-механическая модель позволяет произвести расчет такого оборудования при его проектировании для заданных условий, с целью уменьшения энергозатрат при обеспечении высокого качества конечного продукта.

Produced conceptual analysis of the vibration of the crusher. Received physico-mechanical model allows the calculation of such equipment during its design for the given conditions, with the aim of reducing energy consumption while maintaining high quality of the final product

Одна из важных составляющих успешного функционирования доменного производства – рациональная форма организации подготовки доменной шихты. В настоящее время производство и подготовка шихты доменного производства осуществляется преимущественно у производителя. Применяемое на этапе производства шихты крупное дробильное оборудование, не ограничивает образование мелочи. Известно, что присутствие в доменной шихте частиц с крупностью меньше 3 мм, снижает газопроницаемость в рабочей зоне печи, что обуславливает необходимость дополнительного отсева мелочи, перед загрузкой шихты в доменную печь, однако и это мероприятие не позволяет значительно снизить содержание мелочи в шихте.

Логичным путем снижения мелочи в шихтовых материалах является снижение её образования в процессе производства.

Выходом из создавшегося положения может служить создание специальное дробильное оборудование, позволяющего минимизировать образование некондиционной мелочи при дроблении исходной шихты. Замечено, что выход мелочи снижается при вибрационном дроблении. Это объясняется рядом характерных особенностей вибрационного процесса и вибрационного оборудования. Так, высокая транспортирующая способность в рабочем пространстве вибрационных дробилок минимизирует время нахождения мелочи в зоне измельчения, а это приводит к устране-

нию подушки из мелкого продукта, что в свою очередь уменьшает явление самоизмельчения и способствует эффективному раскалыванию крупных частиц на части с кондиционной крупностью. Как результат, в процессе дробления уменьшаются энергозатраты при обеспечении высокого качества конечного продукта.

Предложенная нами конструкция дробилки с коническим рабочим каналом (рис. 1), образованным нижней 1 и верхней 2 соосными коническими поверхностями. Загрузка материала в рабочий канал производится через дефлектор 3.

Принцип действия дробилки основан на дезинтеграции частиц материала посредством их циклического разрушения при изменении просвета в рабочем канале. Просвет рабочего канала меняется по гармоническому закону при осевых колебаниях рабочего органа дробилки, образующего подвижную стенку.

Возможны два варианта исполнения рабочего органа дробилки: с верхней вибрирующей рабочей поверхностью (рис. 1-а) и нижней вибрирующей рабочей поверхностью (рис. 1-б).

Дробилка предназначена для доведения кускового продукта с исходной максимальной крупностью d_{\max} , подаваемого в ее дефлектор 3, до кондиционного класса крупности с минимальным размером куска d_{\min} . Причем, продукт меньшего класса крупности является некондиционным.

Таким образом, предлагаемая в настоящей работе физико-механическая модель вибрационного дробления позволяет минимизировать энергетические затраты при повышении качества дробленого продукта.

Рассмотрены пути оптимизации формы рабочего канала дробилки, позволяющие решить поставленную задачу.

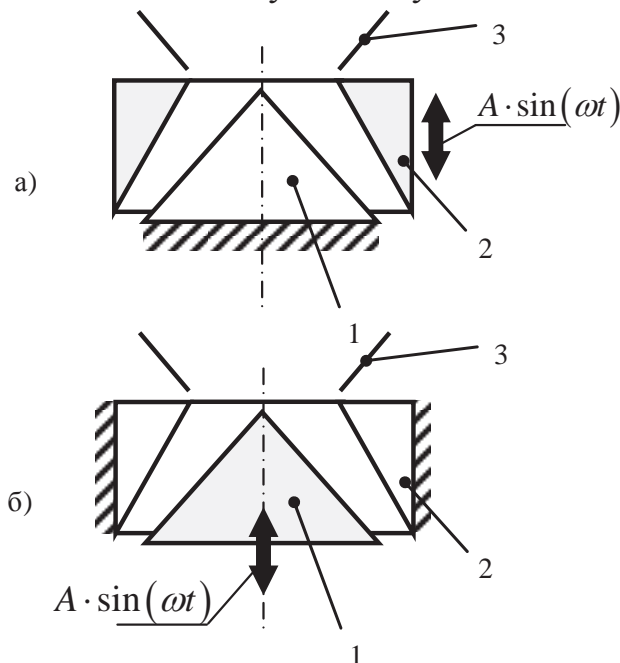


Рис. 1. Принципиальная схема дробилки:

а) с вибрирующей верхней поверхностью рабочего канала; б) с вибрирующей нижней поверхностью рабочего канала.

Рабочий канал дробилки выполнен таким образом, чтобы мелкие фракции разрушаемого продукта имели возможность самопроизвольного движения под действием силы тяжести в разгрузочную область. В связи с этим, минимальный угол наклона β нижней его стенки (рис. 2) с горизонтом должен быть не меньше угла естественного откоса θ . Т.е. для опорной стенки канала дробилки должно выполняться:

$$\beta > \theta \quad (1)$$

Подача частиц в зону дробилки происходит самотеком, под действием силы тяжести. Уменьшение просвета рабочей камеры не должно производить выталкивающего действия на частицы. Заклинивание частиц между стенками произойдет тогда, когда выполняется условие самоторможения:

$$\alpha < \arctg(f_{ск}), \quad (2)$$

где $f_{ск}$ - коэффициент трения скольжения между частицами дробимого материала и стенками камеры. Например, принимая коэффициент трения скольжения, равным 0.3, получаем $\alpha < 17^\circ$.

Угол конусности рабочего канала определяет собой длину рабочего участка канала. А именно, если заданы максимальный размер частиц материала на входе в канал d_{max} и максимальный размер частиц кондиционного продукта d_{kmax} на выходе из него, то длина рабочего участка L определится посредством геометрического соотношения:

$$L = 0.5 \cdot (d_{max} - d_{kmax}) \cdot ctg(\alpha) \quad (3)$$

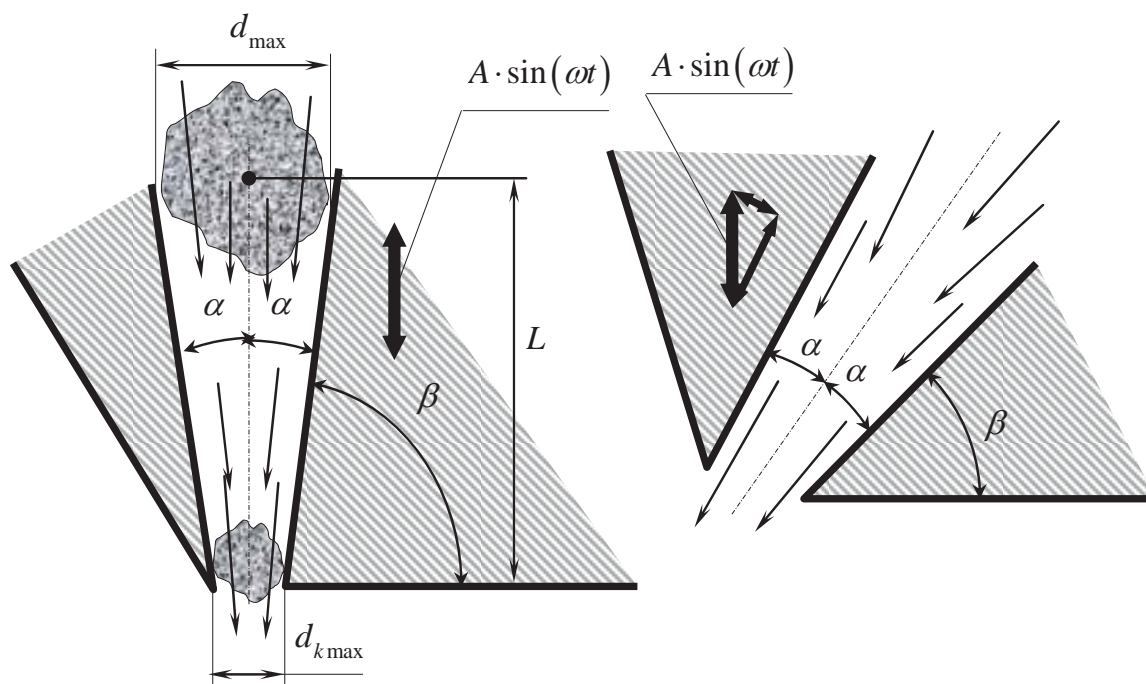


Рис. 2. Крутой и пологий рабочие каналы

Таким образом, длина рабочего канала дробилки есть функция технологических размеров, механических свойств сырья и угла наклона стенки канала к его оси симметрии. Но это также накладывает ограничение на длину рабочего канала. С учетом (2) предельное значение длины канала определится соотношением:

$$L_{\max} = \frac{d_{\max} - d_{k\max}}{2f_{\text{СК}}} \quad (4)$$

Расположение оси симметрии рабочего канала из условия минимизации времени нахождения материала в канале (для уменьшения переизмельчения материала) должно максимально приближаться к вертикальному:

$$\alpha + \beta \rightarrow 90^\circ \quad (5)$$

Если ось симметрии рабочего канала наклонная, то цикловое вибрационное перемещение рабочей поверхности раскладывается по отношению к этой оси на продольное и поперечное перемещения:

$$\begin{cases} x_n = A \cos(\alpha + \beta) \cdot \sin(\omega t) \\ x_\tau = A \sin(\alpha + \beta) \cdot \sin(\omega t) \end{cases} \quad (6)$$

Поперечное перемещение создает исключительно сжимающее воздействие на частицы материала, создавая в теле частиц нормальные напряжения и отнимая транспортирующее действие у продольного перемещения. Поперечные составляющие колебаний рабочей поверхности вследствие взаимодействия её с дробимым материалом, будут приводить к уменьшению амплитуды.

Продольное перемещение обладает двояким действием: оно обеспечивает значительное сдвиговое воздействие при наличии сжимающего с учетом заклинивания частиц в канале при ходе вверх (создавая в теле частиц объемное напряженное состояние); оно также способствует уменьшению времени нахождения материала в зоне дробления и уменьшает переизмельчение при ходе вниз.

На выбор геометрии рабочего канала существенное влияние оказывают прочностные свойства частиц дробимого материала.

В процессе вибрации рабочего органа, вне зависимости от угла наклона рабочего канала, ширина щели канала изменяется (рис. 3); при её размере $d_{k\max}$ в дробленном материале возможно.

При перемещении рабочего органа в продольном направлении относительно оси симметрии канала и при смещении стенки рабочего органа на величину амплитуды вибрации, как показано на рис. 3, для максимального просвета имеем соотношение:

$$d_0 = (d_{k\max} + A_\tau \cdot \operatorname{tg} \alpha) \cos \alpha = d_{k\max} \cdot \cos \alpha + A_\tau \cdot \sin \alpha$$

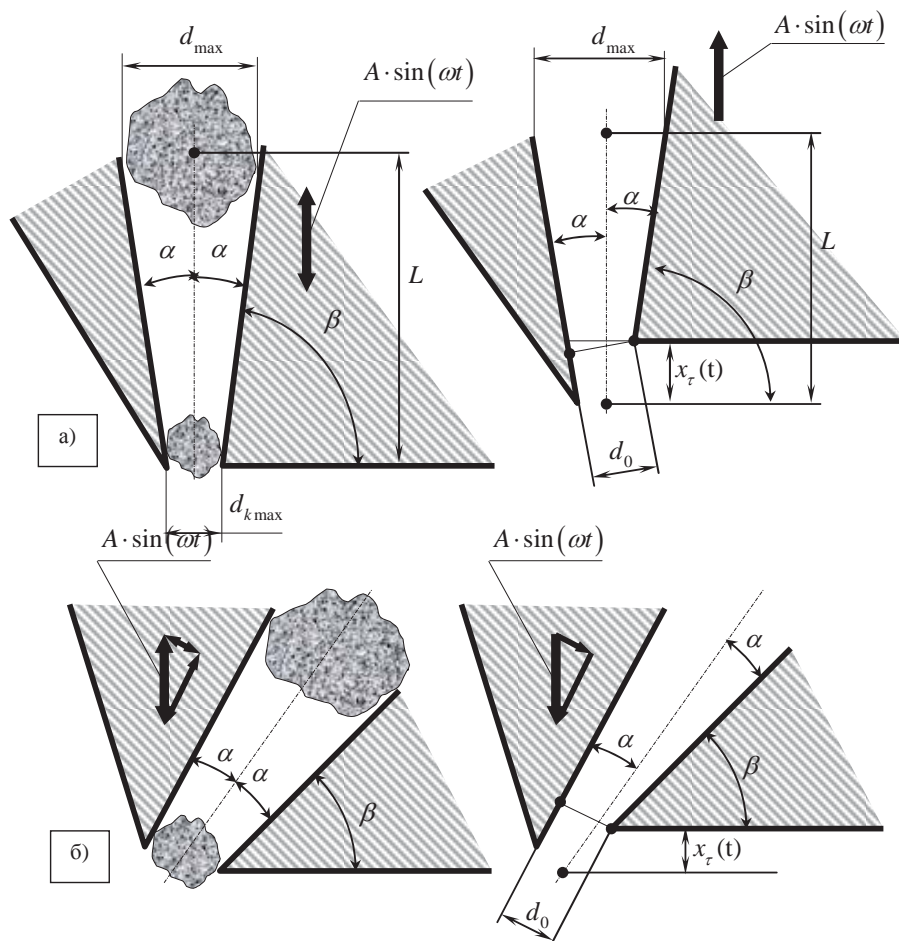


Рис. 3. Увеличение ширины щели при крайних положениях рабочего органа для вертикального (а) и наклонного (б) канала соответственно

Величина максимального изменения просвета за период колебаний рабочего органа вдоль оси симметрии канала примет вид:

$$\Delta_{\tau} = \pm [A_{\tau} \cdot \sin \alpha - d_{k \max} (1 - \cos \alpha)] \quad (7)$$

При перемещении рабочего органа в поперечном направлении относительно оси симметрии канала его просвет изменится на амплитуду этого перемещения:

$$\Delta_n = \pm A_n \quad (8)$$

Изменение просвета при наклонном канале, когда колебания, подчиняются соотношению (6), будет определяться суммой изменений просвета для каждой из составляющих колебаний:

$$\Delta = \Delta_{\tau} + \Delta_n = \pm [A_{\tau} \cdot \sin \alpha + A_n - d_{k \max} (1 - \cos \alpha)] \quad (9)$$

При вертикальном канале $(\alpha + \beta) = 90^\circ$, как на рис. 3-а, поперечное перемещение отсутствует. Поэтому продукты дробления будет иметь размеры большие, чем величина щели

$$d_{k \max}^+ = d_{k \max} + \Delta_{\tau}$$

$$d_{k \max}^+ = d_{k \max} + \left[A \cdot \sin \alpha - d_{k \max} (1 - \cos \alpha) \right] \quad (10)$$

При наклонном канале (рис. 3-б), при котором $(\alpha + \beta) < 90^\circ$ продукт дробления будет иметь отклонение по крупности в большую сторону в соответствии с соотношением

$$d_{k \max}^+ = d_{k \max} + \Delta$$

$$d_{k \max}^+ = d_{k \max} \cos \alpha + A \left[\sin(\alpha + \beta) \cdot \sin \alpha + \cos(\alpha + \beta) \right] \quad (11)$$

Из (10) и (11) можно увидеть, что в некоторых практических случаях превышением размера самых крупных частиц материала над размером щели можно пренебречь.

Рабочий цикл дробления находящихся в рабочем канале частиц, состоит из нескольких характерных этапов.

На первом этапе происходит движение рабочего органа в сторону увеличения поперечного сечения рабочего канала. При этом находящийся в канале материал под действием силы тяжести перемещается в сторону разгрузки через калибровочный зазор канала. Освободившееся пространство в рабочем канале заполняется материалом из загрузочного бункера.

Второй этап определяется движением рабочего органа в сторону уменьшения просвета канала. При этом происходит уплотнение частиц материала в рабочей зоне, сопровождающееся интенсивным самоизмельчением частиц. Этап продолжается до момента заклинивания частиц между рабочими поверхностями канала.

Третий этап сопровождается сжатием частиц, заклинившихся в просвете канала. При этом происходит дробление частиц материала, на что расходуется значительная часть кинетической энергии рабочего органа.

Рассмотрим рабочий режим дробилки на этапе увеличения просвета рабочего канала.

Первый этап начинается от момента, когда в своем крайнем положении рабочий орган останавливается, образуя рабочий канал с наименьшим просветом. Этап сопровождается расширением канала и стесненным падением частиц под действием силы тяжести. Расчетная схема процесса представлена на рис. 4. Из рисунка видно, что одномассный рабочий орган дробилки может образовывать как верхнюю подвижную поверхность рабочего канала (рис. 4-а), так и нижнюю его поверхность (рис. 4-б). Каждое из конструктивных решений по-своему влияет на поведение частиц.

При верхней подвижной поверхности, в процессе увеличения проходного сечения рабочего канала, частицы опираются на его нижнюю неподвижную поверхность и соскальзывают вниз. На частицу действуют следующие силы:

- сила тяжести \bar{G} ;
- сила нормальной реакции опорной поверхности \bar{N} ;

- сила вязкого сопротивления движению со стороны окружающего массива частиц \bar{P} ;

- сила трения скольжения \bar{F} при движении по опорной поверхности.

В процессе увеличения проходного сечения рабочего канала частицы опираются на его нижнюю поверхность. Эта поверхность совершает ускоренное движение вниз (рис. 4-б). В результате на частицу дополнительно действует сила инерции \bar{Q} , которая уменьшает силу трения.

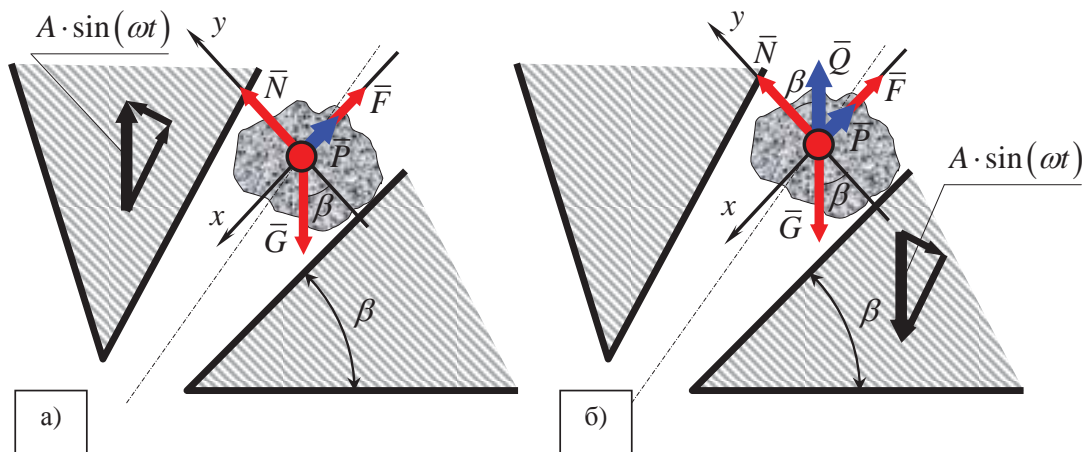


Рис. 4. Движение частиц материала при увеличении просвета рабочего канала при движении верхней (а) и нижней (б) поверхности канала соответственно

Определимся с величиной действующих на частицу сил.

$$|G| = mg ;$$

$$|F| = k \cdot |N| ;$$

$$|P| = \mu \cdot \rho_- \cdot \dot{x} ;$$

$$|Q| = m \cdot A\omega^2 \sin(\omega t) .$$

Введены следующие обозначения:

m - масса частицы, кг;

k - безразмерный коэффициент трения скольжения;

μ - эмпирический коэффициент вязкого сопротивления движению частицы в присутствии облака других частиц, м³/с;

ρ_- - плотность облака мелких частиц некондиционных размеров на этапе расширения просвета рабочего канала, кг/м³;

A - амплитуда линейных вертикальных колебаний рабочего органа, м;

ω - круговая частота колебаний рабочего органа, с⁻¹.

Основной закон динамики для движения частицы в случае верхнего расположения рабочего органа (рис. 4-а):

$$m \cdot \ddot{x} = -F - P + G \cdot \sin \beta$$

С учетом того, что $N = G \cdot \cos \beta$, дифференциальное уравнение движения частицы на этапе примет вид:

$$\ddot{x} + \frac{\mu}{m} \cdot \rho_- \dot{x} = g \cdot (\sin \beta - k \cos \beta) \quad (12)$$

Основной закон динамики для абсолютного движения частицы в случае нижнего расположения рабочего органа (рис. 4-б) запишется в прежней форме:

$$m \cdot \ddot{x} = -F - P + G \cdot \sin \beta$$

Однако в этом случае нормальная реакция опорной поверхности изменится. Баланс сил вдоль оси y включает силу инерции в относительном движении частицы:

$$N - G \cdot \cos \beta + Q \cdot \cos \beta = 0$$

$$\text{Откуда } N = (G - Q) \cdot \cos \beta = \left[g - A\omega^2 \sin(\omega t) \right] m \cdot \cos \beta .$$

Учитывая то, что связь с опорной поверхностью односторонняя, нормальная реакция вибрирующей опоры в процессе ее движения вниз, подчиняется условию:

$$N = \begin{cases} \left[g - A\omega^2 \sin(\omega t) \right] m \cdot \cos \beta, & \text{если } g > A\omega^2 \sin(\omega t) \\ 0, & \text{если } g \leq A\omega^2 \sin(\omega t) \end{cases} \quad (13)$$

Тогда дифференциальное уравнение движения частицы на этапе, также подчиняется условию, и примет вид:

$$\left| \begin{array}{l} \ddot{x} + \frac{\mu}{m} \rho_- \dot{x} = g \cdot (\sin \beta - k \cdot \cos \beta) + kA\omega^2 \cos \beta \cdot \sin(\omega t), \text{ если } g > A\omega^2 \sin(\omega t) \\ \ddot{x} + \frac{\mu}{m} \rho_- \dot{x} = g \cdot \sin \beta, \text{ если } g \leq A\omega^2 \sin(\omega t) \end{array} \right. \quad (14)$$

Этап завершается остановкой рабочего органа в своем крайнем положении с образованием наибольшего просвета рабочего канала, т.е. его продолжительность составляет полпериода колебаний рабочего органа.

Из (13) и (14) следует, что на этапе стесненного падения частиц в рабочем канале при вибрационном ускорении большем g , их трение о нижнюю стенку опорной поверхности при ее движении вниз отсутствует, что увеличивает скорость транспортирования частиц к разгрузочной щели. Однако движущей силой, поддерживающей транспортирование материала в рабочем канале при его расширении, является сила тяжести. Поэтому правильный подбор частоты колебаний рабочего органа с целью минимизировать время нахождения частиц материала в рабочем канале дробилки играет существенную роль.

Если под действием вибрации находится верхняя поверхность рабочего канала дробилки, то дифференциальное уравнение движения потока материала на этапе расширения канала соответствует форме (12). При этом движение верхней рабочей поверхности облегчает транспортирование материала только тем, что просвет канала растет. Определим этапное перемещение частицы материала в канале. Решением (12) будет выражение:

$$x(t) = (\sin \beta - k \cos \beta) \cdot \frac{g \cdot m}{\mu \cdot \rho_-} \cdot t + \left[(\sin \beta - k \cos \beta) \cdot \frac{g \cdot m}{\mu \cdot \rho_-} - v_0 \right] \cdot \frac{m}{\mu \cdot \rho_-} e^{\left(-\frac{\mu \cdot \rho_-}{m}\right)t} - \quad (15)$$

$$- (\sin \beta - k \cos \beta) \cdot \frac{g \cdot m^2}{\mu^2 \cdot \rho_-^2} + \frac{m}{\mu \cdot \rho_-} \cdot v_0 + x_0$$

Момент начала t_0 и конца t_1 этапа уменьшения просвета рабочего канала, удобно принять по отрезкам первого и второго периода колебаний (рис. 5), соответственно: $t_0 = 0.75 \cdot T$; $t_1 = 1.25 \cdot T$, где T - период колебаний рабочего органа.

Перемещение за этап расширения рабочего канала определится по разности координат в эти характерные моменты времени $[x(1.25 \cdot T) - x(0.75 \cdot T)]$:

$$l_i = (\sin \beta - k \cos \beta) \cdot \frac{g \cdot m}{\mu \cdot \rho_-} \cdot 0.5T + \quad (16)$$

$$+ \left[(\sin \beta - k \cos \beta) \cdot \frac{g \cdot m}{\mu \cdot \rho_-} - v_0 \right] \cdot \frac{m}{\mu \cdot \rho_-} \left[e^{\left(-\frac{\mu \cdot \rho_-}{m}\right) \cdot 1.25T} - e^{\left(-\frac{\mu \cdot \rho_-}{m}\right) \cdot 0.75T} \right]$$

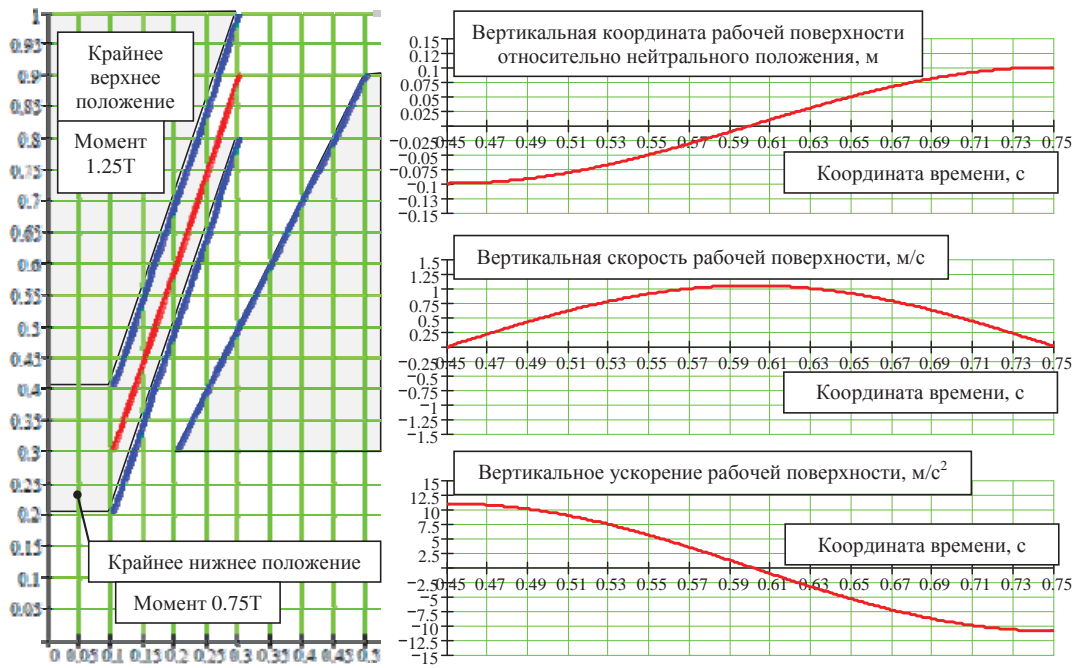


Рис. 5. Процесс увеличения просвета рабочего канала для верхней рабочей поверхности при частоте 1.67Гц от момента времени 0.75T, до момента 1.25T, где T – период колебаний

Для сравнения перемещения частицы в рабочем канале, со свободным перемещением этой частицы под действием силы тяжести, рассчитаем величину свободного перемещения за время 0.5T с нулевыми начальными параметрами по известному кинематическому соотношению:

$$l_0 = 0.125 \cdot gT^2 \quad (17)$$

В соответствии с (16) и (17) можно определить среднюю скорость стесненного движения и движения свободной частицы в рабочем канале.

Если под действием вибрации находится нижняя поверхность рабочего канала дробилки, то дифференциальное уравнение движения потока материала на этапе расширения канала соответствует форме (14). При этом движение нижней рабочей поверхности в сторону увеличения просвета рабочего канала накладывает на частицы силы инерции, которые уменьшают их трение об опорную поверхность.

Решением (14) будет два выражения с условиями:

$$x(t) = \frac{m}{\mu^2 \rho_-^2 + \omega^2 m^2} \times \left\{ e^{\left(-\frac{\mu \rho_-}{m}\right) \cdot t} \left[mg (\sin \beta - k \cos \beta) \left(1 + \frac{m^2 \omega^2}{\mu^2 \rho_-^2}\right) - \mu \rho_- v_0 - \frac{m^2 \omega^2}{\mu \rho_-} (\omega k A \cos \beta + v_0) \right] - \left[-k A \omega \cos \beta (\mu \rho_- \cos(\omega t) + \omega m \cdot \sin(\omega t)) \right] \right\} + (\sin \beta - k \cos \beta) \frac{gm}{\mu \rho_-} \cdot t - (\sin \beta - k \cos \beta) \frac{gm^2}{\mu^2 \rho_-^2} + \frac{m}{\mu \rho_-} (\omega k A \cos \beta + v_0) + x_0 \quad ,$$

$$\text{если } t < \frac{1}{\omega} \arcsin\left(\frac{g}{A\omega^2}\right) \quad (18)$$

$$x(t) = \frac{m}{\mu\rho_-} \left[\left(\frac{mg}{\mu\rho_-} \sin\beta - v_0 \right) e^{\left(-\frac{\mu\rho_-}{m}\right)t} + g \sin\beta \cdot t - \frac{mg}{\mu\rho_-} \sin\beta + v_0 \right] + x_0,$$

$$\text{если } t \geq \frac{1}{\omega} \arcsin\left(\frac{g}{A\omega^2}\right) \quad (19)$$

Момент начала t_0 и конца t_1 этапа уменьшения просвета рабочего канала, удобно принять по отрезку первого периода колебаний (рис. 6) соответственно: $t_0 = 0.25 \cdot T$; $t_1 = 0.75 \cdot T$, где T - период колебаний рабочего органа. Цикловое перемещение определится по разности координат в характерные моменты времени для периода колебаний:

$$l_i = [x(0.75 \cdot T) - x(0.25 \cdot T)]. \quad (20)$$

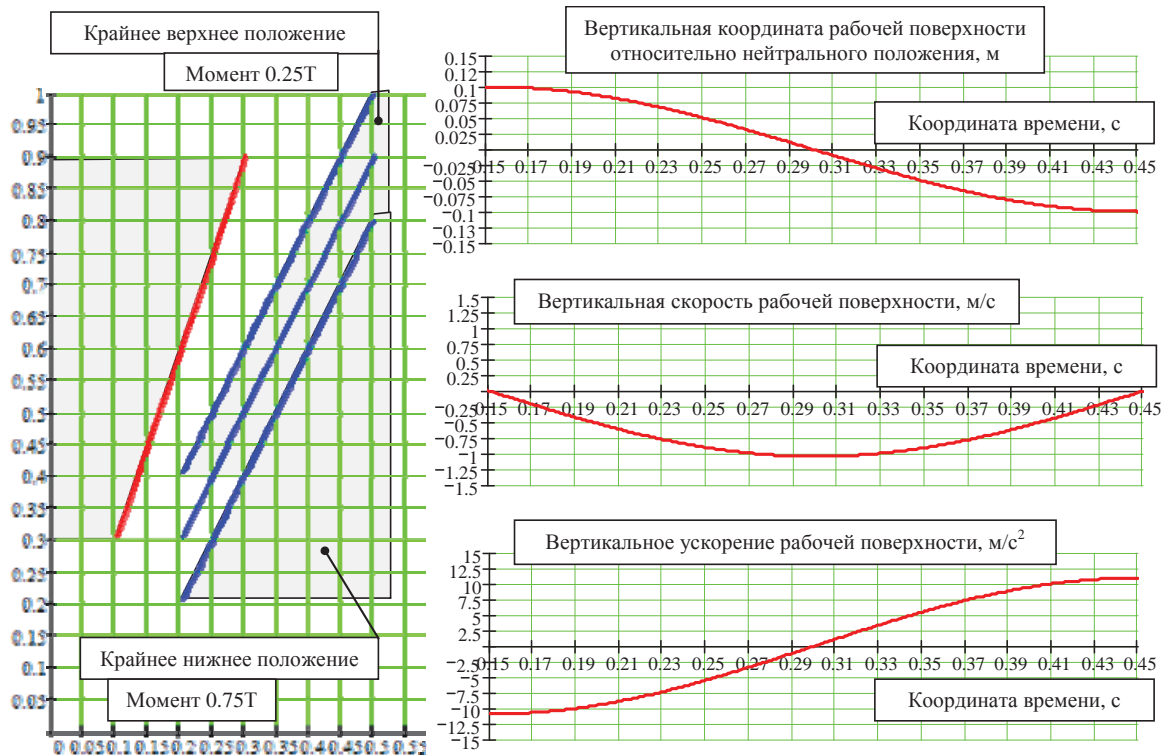


Рис. 6. Процесс увеличения просвета рабочего канала для нижней рабочей поверхности при частоте 1.67Гц от момента времени 0.25T, до момента 0.75T, где T – период колебаний

Если рабочий орган дробилки заставляет вибрировать нижнюю поверхность канала, то вычисление циклового перемещения по формуле (20) требует разбиения времени расширения канала на специфические временные интервалы. Эти временные интервалы позволяют учесть условие отсутствия силы трения о рабочую поверхность канала с соответствующим этому условию выбором расчетных выражений - либо (18), либо (19).

Вычисление этапного перемещения с условиями (18) и (19) требует применения численных методов расчета, т.к. для каждого конкретного случая разбиение временного интервала на специфические отрезки приведет к существенному многообразию решений. Только в том случае, когда параметры вибрации выбраны так, что условие $A\omega^2 \sin(\omega t) < g$ выполняется непременно на всем интервале времени $0.25 \cdot T \leq t \leq 0.75 \cdot T$, вычисление этапного перемещения упрощается до использования одного выражения вида (18).

Так, если условие того, что амплитуда вибрационного ускорения не больше ускорения свободного падения ($A\omega^2 \leq g$) обеспечивается режимом вибрации рабочего органа, то выражение (20) примет следующую развернутую форму:

$$l_i = \frac{m}{\mu^2 \rho_-^2 + \omega^2 m^2} \left[mg(\sin \beta - k \cos \beta) \left(1 + \frac{m^2 \omega^2}{\mu^2 \rho_-^2} \right) - \mu \rho_- v_0 - \frac{m^2 \omega^2}{\mu \rho_-} (\omega k A \cos \beta + v_0) \right] \times \\ \times \left[e^{\left(\frac{-\mu \rho_-}{m} \right) \cdot 0.75T} - e^{\left(\frac{-\mu \rho_-}{m} \right) \cdot 0.25T} \right] + \frac{2m^2 k A \omega^2}{\mu^2 \rho_-^2 + \omega^2 m^2} \cos \beta + (\sin \beta - k \cos \beta) \frac{gm}{\mu \rho_-} \cdot 0.5T$$

Это выражение позволяет определить движение материала если $A\omega^2 \leq g$ на этапе увеличения просвета рабочего канала (в течении полупериода колебаний).

Как только процесс расширения просвета рабочего канала заканчивается, начинается обратный процесс – сужение этого просвета. При этом частицы материала утрачивают тенденцию к продвижению в зону разгрузки из-за увеличения плотности их упаковки и значительно возросшей силы трения, вплоть до полного их заклинивания между стенками рабочего канала. Таким образом, этап является переходным процессом от завершения движения частиц в рабочем канале, до начала их разрушения от давления со стороны стенок. Этап начинается от момента окончания предыдущего этапа расширения просвета и заканчивается моментом заклинивания частиц в канале. Начальные параметры этапа сужения канала являются конечными параметрами этапа его расширения.

Так как в конце этапа расширения рабочего канала находящийся в нем материал под действием силы тяжести двигался вниз по конической сужающейся щели, то в конце этапа зазор между частицами материала и стенками остается незначительным. Величина этого зазора зависит от механических свойств дробимого материала, в частности, от его хрупкости. Если за цикл разрушения исходный диаметр частиц d_1 уменьшается до величины $d_2 = k_d d_1$ (где k_d экспериментальный коэффициент измельчения частицы за цикл), а цикловое смещение частицы вдоль рабочей поверхности известно, то можно определить величину зазора, который выбирается до заклинивания частиц, а, следовательно, и время, требуемое

для заклинивания. Таким образом, продолжительность периода сужения канала может быть определена исходя из прочностных свойств частиц, геометрии канала и характера вибрации рабочего органа дробилки (рис. 7).

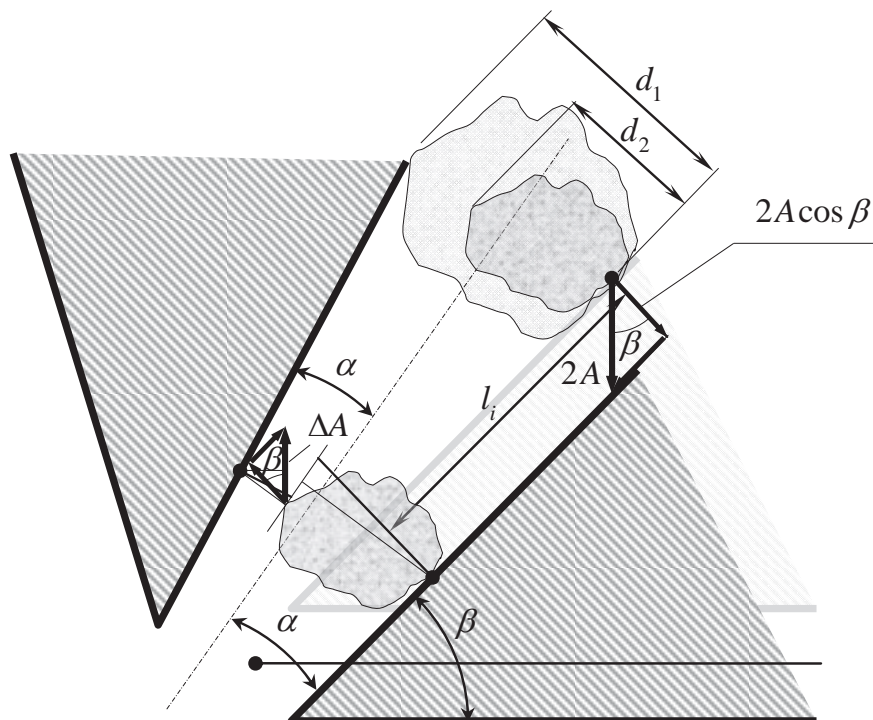


Рис. 7. К расчету времени этапа уменьшения просвета рабочего канала

На рис/ 7 показано изменение просвета рабочего канала за полный рабочий цикл дробилки (за полный период колебаний рабочего органа), включающий в себя три этапа:

- этап дробления частицы с исходного размера d_1 , до размера d_2 (начало этапа дробления показано фоновым контуром);
- этап увеличения просвета, при котором происходит перемещение частицы на расстояние l_i ;

- этап уменьшения просвета канала (начало этапа показано основным контуром), который сопровождается выборкой зазора между частицей и стенками канала путем вертикального перемещения рабочего органа в сторону сужения канала на расстояние ΔA , вплоть до заклинивания частицы размером d_2 .

Составим уравнение изменения поперечного размера просвета за период движения рабочего органа дробилки:

$$l_i \cdot \operatorname{tg}(2\alpha) = (d_1 + 2A \cos \beta) - (\Delta A \cos \beta + d_2)$$

Выделим из уравнения вертикальное перемещение:

$$\Delta A = 2A - \frac{l_i}{\cos \beta} \left[\operatorname{tg}(2\alpha) - \frac{\Delta d}{l_i} \right], \quad (22)$$

где Δd - изменение характерного размера частицы за этап ее разрушения от сжатия между рабочими поверхностями дробилки.

Свяжем найденное перемещение с законом движения рабочего органа:

$A \sin(\omega T_2) = \Delta A$, где T_2 - момент времени, когда зазор ΔA будет выбран.

Из образовавшегося уравнения находим момент завершения периода уменьшения просвета рабочего канала:

$$T_2 = \frac{1}{\omega} \arcsin\left(\frac{\Delta A}{A}\right) \quad (23)$$

Таким образом, период сужения просвета рабочего канала завершается в момент T_2 , который рассчитывается по формуле (23) при подстановке (22), и величины циклового перемещения l_i с учетом того, какая именно поверхность рабочего канала участвует в вибрационном движении, и какая амплитуда вибрационного ускорения достигнута.

На основании (22) можно соотнести прочностные свойства дробимого материала с конструктивными особенностями рабочего канала дробилки и характером вибрации ее рабочего органа. Действительно, если $\frac{\Delta d}{l_i} \geq \operatorname{tg}(2\alpha)$, то частица не будет прижата к рабочим поверхностям канала,

и процесс прямого дробления за один цикл произойти не сможет (при соблюдении равенства контакт произойдет только в момент полного завершения цикла сужения просвета канала). Но в таком случае процесс прямого дробления частиц будет происходить как минимум с одним холостым циклом, сопровождающимся самоизмельчением. А последнее обстоятельство непременно приведет к переизмельчению продукта и к повышению механических потерь в цикле за счет внутреннего трения в образовавшейся подушке мелкого материала. Эффективность дробилки резко упадет. Таким образом, на основании (22) можно сделать следующий важный вывод. Для обеспечения высокой эффективности дробления в вибрационной дробилке при любом исполнении ее рабочего органа, непременно следует выдерживать условие:

$$\frac{\Delta d}{l_i} < \operatorname{tg}(2\alpha) \quad (24)$$

Или, что то же самое:

$$l_i > \frac{\Delta d}{\operatorname{tg}(2\alpha)} \quad (25)$$

где параметр $\Delta d = d_1 - d_2$ определяется хрупкостью частицы, т.е. способностью раскалываться на части (чем на большее количество частей раскалываются частицы, тем больше величина этого параметра), параметр α - трением скольжения частицы по поверхности стенки, а параметр l_i опре-

деляется как вибрационным ускорением, так и углом наклона β опорной поверхности.

Таким образом, при сопоставлении расчетного значения циклового перемещения l_i частицы с условием (25) появляется возможность выбора допустимого значения угла β опорной поверхности.

Рассмотрим действие сил на частицу за период сужения просвета рабочего канала при ее движении относительно опорной поверхности для двух случаев: вибрирующей верхней рабочей поверхности (рис. 8-а) и вибрирующей нижней рабочей поверхности (рис. 8-б). По сравнению с рис. 4 схема сил изменится только для случая вибрирующей нижней стенки канала – сила инерции поменяет свое направление. Кроме того, на этапе уменьшения просвета рабочего канала сила вязкого сопротивления будет изменяться во времени в сторону увеличения, вместе с ростом плотности облака окружающих мелких частиц.

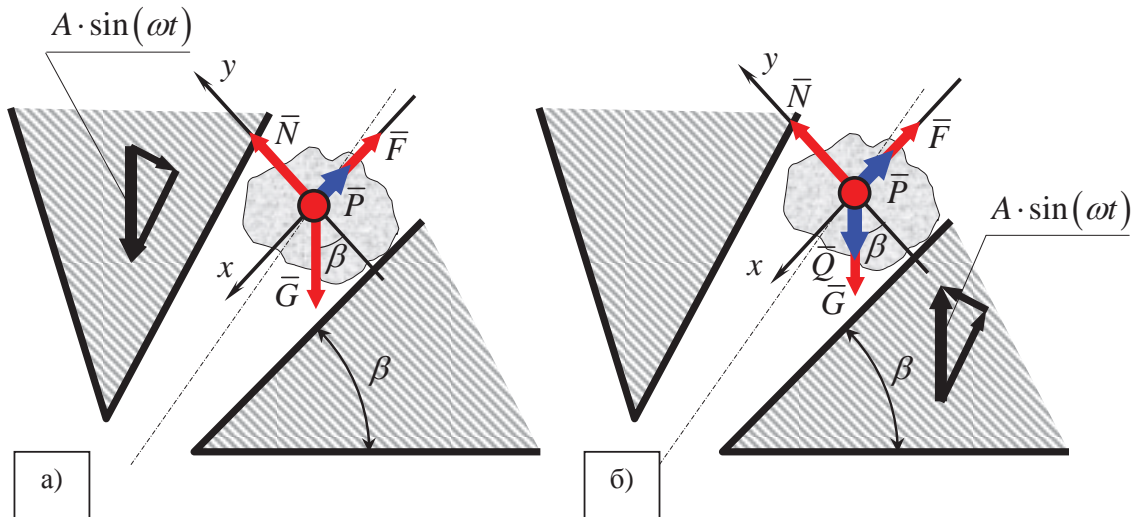


Рис. 8. Движение частиц материала при уменьшении просвета рабочего канала при движении верхней (а) и нижней (б) поверхности канала соответственно

В соответствии с рис. 7-а на частицу действуют:

- сила тяжести \vec{G} ;
- сила нормальной реакции опорной поверхности \vec{N} ;
- сила вязкого сопротивления движению со стороны окружающего массива частиц \vec{P} ;
- сила трения скольжения \vec{F} при движении по опорной поверхности.

При нижней подвижной поверхности (рис. 8-б) на частицу в ее движении относительно опорной стенки дополнительно действует сила инерции \vec{Q} , которая уменьшает силу трения.

Определимся с величиной действующих на частицу сил.

$$|G| = mg;$$

$$|F| = k \cdot |N|;$$

$$|P| = \mu \cdot \rho_2 \cdot \dot{x};$$

$$|Q| = m \cdot A\omega^2 \sin(\omega t).$$

Введены следующие обозначения:

m - масса частицы, кг;

k - коэффициент трения скольжения;

μ - эмпирический коэффициент вязкого сопротивления движению частицы в присутствии облака других частиц, м³/с;

ρ_2 - средняя плотность облака мелких частиц некондиционных размеров на этапе, кг/м³ (экспериментальная величина);

A - амплитуда линейных вертикальных колебаний рабочего органа, м;

ω - круговая частота колебаний рабочего органа, с⁻¹.

Основной закон динамики для движения частицы в случае верхнего расположения рабочего органа (рис. 7-а):

$$m \cdot \ddot{x} = -F - P + G \cdot \sin \beta$$

С учетом того, что $N = G \cdot \cos \beta$, дифференциальное уравнение движения частицы на этапе примет вид:

$$\ddot{x} + \frac{\mu}{m} \cdot \rho_2 \dot{x} = g \cdot (\sin \beta - k \cos \beta) \quad (26)$$

Решением уравнения (26) будет:

$$x(t) = (\sin \beta - k \cos \beta) \cdot \frac{g \cdot m}{\mu \cdot \rho_2} \cdot t + \left[(\sin \beta - k \cos \beta) \cdot \frac{g \cdot m}{\mu \cdot \rho_2} - v_0 \right] \cdot \frac{m}{\mu \cdot \rho_2} e^{\left(-\frac{\mu \cdot \rho_2}{m}\right)t} - \quad (27)$$

$$- (\sin \beta - k \cos \beta) \cdot \frac{g \cdot m^2}{\mu^2 \cdot \rho_2^2} + \frac{m}{\mu \cdot \rho_2} \cdot v_0 + x_0$$

Учитывая то, что $\rho_2 \gg \rho_-$, т.е. средняя плотность укладки мелких частиц при сужении просвета канала намного больше величины плотности укладки при его расширении, перемещением частицы на этапе сужения канала при верхней подвижной его поверхности пренебрежимо мало.

Основной закон динамики для абсолютного движения частицы в случае нижнего расположения рабочего органа (рис. 7-б) запишется в прежней форме:

$$m \cdot \ddot{x} = -F - P + G \cdot \sin \beta$$

Однако в этом случае нормальная реакция опорной поверхности изменится. Баланс сил вдоль оси y включает силу инерции в относительном движении частицы:

$$N - G \cdot \cos \beta - Q \cdot \cos \beta = 0$$

Откуда $N = (G + Q) \cdot \cos \beta = \left[g + A\omega^2 \sin(\omega t) \right] m \cdot \cos \beta$. Несмотря на то, что связь с опорной поверхностью односторонняя, нормальная реакция вибрирующей опоры в процессе ее движения вверх будет положительной

величиной при любых обстоятельствах. Поэтому для нее не потребуется дополнительного условия:

$$N = \left[g + A\omega^2 \sin(\omega t) \right] m \cdot \cos \beta \quad (28)$$

Тогда дифференциальное уравнение движения частицы на этапе также не требует условия:

$$\ddot{x} + \frac{\mu}{m} \rho_2 \dot{x} = g \cdot (\sin \beta - k \cdot \cos \beta) - kA\omega^2 \cos \beta \cdot \sin(\omega t) \quad (29)$$

Решением уравнения (29) будет:

$$x(t) = \frac{m}{\mu^2 \rho_2^2 + \omega^2 m^2} \times \quad (30)$$

$$\times \left\{ e^{\left(\frac{-\mu \rho_2}{m} \right) t} \left[mg (\sin \beta - k \cos \beta) \left(1 + \frac{m^2 \omega^2}{\mu^2 \rho_2^2} \right) - \mu \rho_2 v_0 + \frac{m^2 \omega^2}{\mu \rho_2} (\omega k A \cos \beta - v_0) \right] + \right. \\ \left. + kA\omega \cos \beta (\mu \rho_2 \cos(\omega t) + \omega m \cdot \sin(\omega t)) \right\} + \\ + (\sin \beta - k \cos \beta) \frac{gm}{\mu \rho_2} \cdot t - (\sin \beta - k \cos \beta) \frac{gm^2}{\mu^2 \rho_2^2} + \frac{m}{\mu \rho_2} (v_0 - \omega k A \cos \beta) + x_0$$

Учитывая то, что $\rho_2 \gg \rho_-$, т.е. средняя плотность укладки мелких частиц при сужении просвета канала намного больше величины плотности укладки при его расширении, перемещением частицы на этапе сужения канала при верхней подвижной его поверхности можно пренебречь.

Таким образом, как при верхнем, так и при нижнем расположении рабочего органа, перемещением частиц на этапе можно пренебречь. Однако полученное для этапа выражение (25), позволяет произвести оптимизацию формы рабочего канала и параметров вибрации его стенки.

По окончании этапа уменьшения просвета рабочего канала, когда зазор между частицами и его стенками выбран, начинается этап сдавливания частиц.

В каждом конкретном случае при дроблении частиц материала посредством их одноосного сжатия, ставится в соответствие величина разрушающего механического напряжения σ_R в их теле, к их величине разрушающей относительной деформации ε_R . Но в таком случае в соответствии с обозначениями на рис. 7, имеем:

$$(d_1 - d_2) = \Delta d = \varepsilon_R \cdot d_1 \quad (31)$$

Тогда формулу (22) можно переписать в виде:

$$\Delta A = 2A - \frac{l_i}{\cos \beta} \left[\operatorname{tg}(2\alpha) - \frac{\varepsilon_R \cdot d_1}{l_i} \right], \quad (32)$$

Из рис. 7 видно, что вибрационное перемещение, используемое для сжатия частицы, является разностью между размахом колебаний рабочего органа дробилки и вибрационным перемещением при выборке зазора между частицей и стенкой при ее заклинивании. Т.е. можно записать:

$$A_d = 2A - \Delta A ,$$

где A_d - перемещение рабочего органа, расходуемое на сжатие частицы.

Но эта разность содержится в (31):

$$2A - \Delta A = \frac{l_i}{\cos \beta} \left[\operatorname{tg}(2\alpha) - \frac{\varepsilon_R \cdot d_1}{l_i} \right]$$

Таким образом, вибрационное перемещение, расходуемое на сжатие частицы, зависит от конструктивных параметров рабочего канала дробилки и от параметров вибрации ее рабочего органа:

$$A_d = \frac{l_i}{\cos \beta} \left[\operatorname{tg}(2\alpha) - \frac{\varepsilon_R \cdot d_1}{l_i} \right] \quad (33)$$

Разрушение произойдет, если вибрационное перемещение, расходуемое на сжатие частицы, будет совпадать, или несколько больше, чем требуемая для ее разрушения деформация. Это условие имеет вид $A_d \geq \Delta d$.

Или иначе:

$$\frac{l_i}{\cos \beta} \left[\operatorname{tg}(2\alpha) - \frac{\varepsilon_R \cdot d_1}{l_i} \right] \geq \varepsilon_R \cdot d_1 \quad (34)$$

Это условие позволяет сформулировать требование к цикловому перемещению частицы, а значит, к конструктивным особенностям рабочего канала дробилки и характеру вибрационного движения ее рабочего органа, для осуществления процесса дробления за каждый период его колебаний:

$$l_i \geq \frac{(\cos \beta + 1)}{\operatorname{tg}(2\alpha)} d_1 \varepsilon_R \quad (35)$$

При выполнении условия (35) процесс прямого разрушения частиц их сдавливанием между стенками рабочего канала будет осуществляться наиболее интенсивно.

Этап сжатия частиц в рабочем канале завершается переходом в новый цикл движений: расширение канала, сопровождающееся транспортированием материала, затем его сужение до заклинивания частиц между стенками канала и, наконец, этап сжатия частиц, с доведением их до разрушения. Последовательность этапов повторяется на каждом последующем цикле, вплоть до выхода частиц из калибровочного зазора дробилки.

Выводы: рассмотрена кинематика рабочего органа вибрационной конусной дробилки с учетом его взаимодействия с дробимым материалом.

УДК 621.926.3(2)

Н.А.ДАЦ, аспирант, С.В.ШВЕД, канд. техн. наук, доцент,
Д.В.ПОПЛОВ, канд. техн. наук, доцент
ГВУЗ «Криворожский национальный университет»