

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА СКОРОСТЬ ПОДАЧИ ИЗМЕЛЬЧАЕМЫХ СЫПУЧИХ ТЕЛ

С.В. ПЕРЕПЕЛИЦА

Процессы, протекающие при измельчении сыпучих тел, являются сложными и тяжело поддаются описанию.

А.В. Ротенберг предложил рассматривать совокупность измельчаемых частиц как эффективную сплошную среду, имеющую, соответствующим образом определенные, входящие в систему уравнений динамические величины и константы.

Построенная им модель получилась нелинейной и содержит ряд базовых материальных констант, эти особенности появились в связи с более общими свойствами этой модели по сравнению с аналогичными частными случаями.

Базовым выражением его модели является реологическое уравнение сыпучего тела для тензора сопротивления

$$\sigma_{ij} = \left( \frac{f_i(P+G)}{2S} + \frac{\alpha q_{\tau}}{\pi(\alpha^2 + S^2)} \right) \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \right) + \left( \frac{f_n(P+G)}{3S} + \frac{2 \alpha q_n}{3\pi(\alpha^2 + S^2)} \right) \delta_{ij} \frac{\partial v_l}{\partial x_l},$$

где  $S$  - интенсивность тензора скоростей деформаций,

$$S_{ij} = \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \right) + \delta_{ij} \frac{\partial v_l}{\partial x_l},$$

$P$  – давление,

$G$  – потенциал удельной равнодействующей объемных сил,

$v_i$  – компоненты скорости ( $i=1, 2, 3$ ),

$x_i$  – координаты ( $i=1, 2, 3$ ),

$\delta_{ij}$  – символ Кронекера,

$f_{\tau}, f_n, q_{\tau}, q_n, \alpha$  – константы среды (величины  $f_{\tau}, f_n$  – безразмерные, размерность  $q_{\tau}, q_n, -H/M^2 c^2$ )

Искомый тензор сопротивления  $\sigma_{ij}$  удовлетворяет следующим требованиям.

1. Тензор  $\sigma_{ij}$  должен являться обобщением выражений (3), (4). Это означает, что при переходе от эффективной сплошной среды к материальной точке величина  $\sigma_{ij}$  должна превращаться в сумму  $F_q$  и  $F_S$ .

$$F_q = -q \frac{2\alpha}{\pi} \frac{v}{(\alpha^2 + v^2)^2},$$

где  $F_q$  – сила трения покоя;

$$F_S = -fp \frac{v}{\sqrt{v^2 + u^2}},$$

где  $F_S$  – сила трения скольжения.

2. Процессы внутреннего трения в среде возникают только тогда, когда соприкасающиеся участки среды движутся с различной скоростью, т.е. когда существует относительное движение частей среды. Поэтому тензор  $\sigma_{ij}$  должен зависеть не от самих скоростей, а от их производных по координатам и обращаться в нуль, когда среда движется как целое.

3. Тензор  $\sigma_{ij}$  должен обращаться в нуль также и в том случае, когда вся среда как целое совершает равномерное вращение. Это означает, что  $\sigma_{ij}$  должен быть симметричен.

Ротенберг сформулировал «правило матрешки» (рис. 1), выполняющееся при любом сложном движении сыпучего тела.

Пространственные области различных динамических состояний среды расположены так, что область кулоновой среды 1 окружена областью вязкой среды 2, которая, в свою очередь, отделена от области ползучести 4 областью аномальной вязкости 3. Область ползучести отделена от области упругости 6 областью предельного состояния 5.

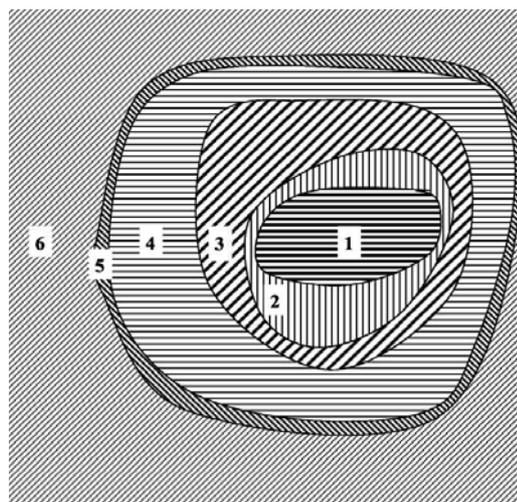


Рисунок 1 – «Правило матрешки» для сыпучего тела: 1 - область кулоновой среды; 2 - область вязкой среды; 3 - область аномальной вязкости; 4 - область ползучести; 5 - область предельного состояния; 6 - область упругости

Описание процессов, происходящих в данных областях, является очень сложной задачей.

В случае же воздействия на движущиеся сыпучие тела измельчающих рабочих органов описание процесса движения имеет гораздо более сложную структуру и может быть представлено лишь в очень отдаленном приближении к действительности.

При изучении данного процесса следует уделять внимание следующим моментам:

- дроблению частиц, важной характеристикой которого является скорость дробления;
- удалению частиц из дробильной камеры установки, что характеризуется скоростью эвакуации.

Рассмотрим скорость дробления и скорость эвакуации относительно зерна как наиболее распространенного измельчаемого тела.

#### Скорость дробления (измельчения) зерна

Дробление зерна в молотковой дробилке происходит при многократном ударно-стирающем воздействии активных и пассивных рабочих органов. Исследованиями С.В. Мельникова установлено, что разрушающая скорость, при которой молоток дробилки способен разрушить зерно одним свободным ударом, определяется из выражения:

$$u_{\text{раз.}} = \sqrt{[(K_d \cdot \sigma_{\text{раз.}} \cdot \ln a/x_1)/\rho]}, \text{ м/сек,}$$

где  $K_d$  – отношение динамического предела прочности к статическому,

$\sigma_{\text{раз.}}$  – разрушающие напряжения, полученные в результате испытания прочности зерна сжатием;

$a$  – длина зерна;

$x_1$  – длина недеформированной части зерна;

$\rho$  – плотность материала зерна.

В молотковой дробилке удар молотком по зерну происходит в условиях движущегося материального слоя. Скорость движения слоя составляет:

$$u_{\text{ск.}} = (0,4 \div 0,5) u_m.$$

Чтобы получить в дробилке действительную скорость соударения молотков с зерном, равную разрушающей, рабочая скорость молотков должна находиться из выражения:

$$u_m = u_{\text{раз.}} + u_{\text{ск.}}$$

или

$$u_m = u_{\text{раз.}} / (1 + \beta_c), \text{ м/сек,}$$

где  $\beta_c = u_{\text{ск.}} / u_m = 0,4 - 0,5$ .

Следовательно, для однократного разрушения зерна скорость молотков должна быть выше разрушающей в  $1,5 \div 2$  раза.

В существующих дробилках замкнутого типа имеет место многократное ударное воздействие молотков на материал.

К примеру, ячменную дерть средней крупности можно получить лишь в результате  $30 \div 35$  свободных ударов влет.

Условие многократного воздействия рабочих органов на зерно представляется в виде уравнения:

$$A_{\text{ядр.сек.}} = k \cdot A_{\text{деф.сек.}},$$

которое показывает, что зерно разрушается лишь в результате "к" ударов, наносимых молотками и, собственно, ударов о поверхность камеры дробилки. Число "к" характеризует необходимое количество прямых, центральных, относительно зерна массой "m", ударов по нему.

В дробилках же, как показывают данные многих исследователей, имеет место в основном нецентральный удар. В связи с этим Елисеевым В.А. были рассмотрены явления, происходящие при нецентральной ударе. Задача о разрушающем действии удара не имеет точного решения, поэтому использовался приближенный способ решения, применяемый в курсе сопротивления материалов:

$$u = \sigma_{g \text{ max}} / \sqrt{(3E \cdot \rho)},$$

где  $\sigma_{g \text{ max}}$  – напряжение в сечении, соприкасающемся с плоскостью молотка;

$u$  – скорость соударения;

$E$  – модуль упругости зерна.

Если принять, что  $\sigma_{g \text{ max}} = \sigma_{\text{раз.}}$ , тогда

$$\rho_{\text{аз.}} = \sigma_{\text{раз.}} / \sqrt{(3E \cdot \rho)},$$

Если принять во внимание, что

$$\sigma_x = \sigma_{g \text{ max}} \cdot (x/a),$$

где  $\sigma_x$  – напряжение в сечении отстоящем на расстоянии  $x$  от конца ударяемого тела, не соприкасающегося с ударяющим телом;

Из вышеприведенного выражения, очевидно, что с уменьшением  $x$  уменьшаются напряжения  $\sigma_x$ .

Предположив выполнение условия:  $\sigma_{g \text{ max}} = \sigma_{\text{разр.}}$ , получим:  $\sigma_x = \sigma_{\text{разр.}} \cdot (x/l)$ .

Можно сделать вывод, что в любом сечении на расстоянии  $x < l$  напряжения будут меньше разрушающих. Отсюда следует, что для возникновения разрушающих напряжений в большей части объема ударяемого тела, необходимо обеспечить скорость удара, превосходящую величину скорости  $u_{\text{раз.}}$

Исходя из этих положений был рассмотрен нецентральный удар. Для нецентрального удара можно записать:

$$A_{\text{деф.сек.}} = m u_0^2 \cdot [1 - (h/r)^2]/2,$$

где  $h$  – расстояние от центра ударяемого шара (принимая зерно за шар) по нормали к вектору скорости молотка;

$r$  – радиус ударяемого шара.

При центральном ударе  $h = 0$ .

Допустим, что  $u_0 = u_{\text{раз.}}$ , тогда

$$A_{\text{деф.сек.}} = m u_{\text{раз.}}^2 \cdot [1 - (h/r)^2]/2.$$

Очевидно, что при всех значениях  $h \neq 0$  энергии деформации недостаточно для разрушения зерна. Помимо этого, зерну при нецентральном ударе будет сообщено вращательное движение, при этом также не будет иметь место разрушение.

Величина энергии, затрачиваемой на вращательное движение, определяется из выражения:

$$A_{\text{вр.}} = 1/5 m \cdot u_0^2 \cdot (h/r)^2/2.$$

По мере измельчения зерна в дробилке периодического действия уменьшается масса отдельных частиц измельченного продукта, а следовательно, увеличивается количество ударов, необходимое для дальнейшего измельчения.

Так как скорость ударов по зерну значительно ниже критической, то постепенно в зерне накапливаются повреждения: вмятины и макротрещины, т.е. идет процесс предразрушения. В дальнейшем зерно раскалывается на несколько частей. При скорости удара выше критической зерно раскалывается сразу. Повреждения создаются за счет возникающих в теле зерна пластических и упругих волн напряжения. Общее энергетическое состояние тела изменяется по мере накопления повреждений, т.е. энергия, сообщаемая телу, затрачивается на деформацию и образование новых поверхностей.

Уменьшение размеров частиц приводит к снижению интенсивности накопления повреждений, несмотря на то, что мелкие частицы освобождаются от оболочки - наиболее прочной части зерна, а эндосперм значительно менее прочен, размол становится более трудным. Это объясняется тем, что масса каждой частицы уменьшается, и энергия удара, соответственно, становится меньшей. Так же становится меньше внутренних неоднородностей, дефектов и местных концентраций напряжений. Следовательно, по мере измельчения увеличивается сопротивляемость материала размолу.

Процесс измельчения можно проиллюстрировать при помощи диаграммного рассмотрения механической обработки сыпучих тел.

Основой диаграммы является кривая зависимостей максимальных напряжений, возникающих в частицах, от размеров частиц при их взаимодействии друг с другом и рабочими органами. Для ее построения предлагается несколько моделей взаимодействия в зависимости от соотношения размеров рабочих органов и измельчаемых частиц. Случаю измельчения зерна соответствует модель измельчения, в которой соотношение размеров рабочих тел и частиц превышает три порядка. В этом случае максимальные напряжения пропорциональны размерам частиц в степени, несколько меньшей единицы. После обработки указанной зависимости получается искомая кривая  $\sigma_y$ , допускающая экспериментальную проверку. Точки  $d_2$  и  $d_3$  пересечения этой кривой с кривой технического предела прочности  $\sigma_b$  (рис. 2) ограничивают зону мгновенного разрушения, а точки  $d_1$  и  $d_4$  пересечения с кривой технического предела прочности  $\sigma_0$  определяют зону усталостного разрушения. Это означает, что частица с размером  $d_0$ , при  $d_0 > d_1$  или  $d_0 < d_4$  будет испытывать лишь упругие воздействия.

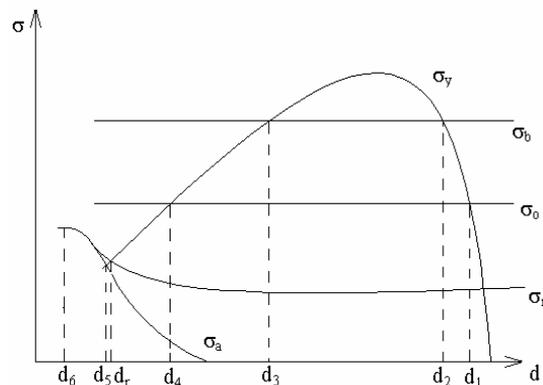


Рисунок 2 – Диаграмма механической обработки сыпучих материалов

Весьма важной является кривая  $\sigma_0$  предела прочности аутогезионного контакта двух частиц. Аутогезионное взаимодействие проявляется для частиц с размерами меньше некоторой характерной для данного материала величины  $d_a$ , возрастает с уменьшением размера частиц и устремляется к теоретическому пределу прочности. Такое взаимодействие порождает агрегацию частиц и кривая  $\sigma_a$  может быть построена экспериментально. По мере роста агрегатов возникающие в них напряжения возрастают, но, вме-

сте с тем, под действием рабочих тел происходит их уплотнение, сопровождающееся ростом числа контактов и повышением прочности, что способствует превращению их в микрогранулы. По достижении определенной плотности изменение предела прочности прекращается и его величина не зависит от размера гранул, а определяется только размерами частиц составляющих гранулу и координационным числом. Это иллюстрируется кривой  $\sigma_r$  предела прочности гранул, которая начинается от точки кривой  $\sigma_a$ , соответствующей размеру  $d_6$ , который имели самые мелкие осколки разрушившихся частиц.

Если кривая  $\sigma_y$  расположена выше кривой  $\sigma_0$  и процесс продолжается достаточно долго, а  $d_1 > d_0 > d_2$ , то вначале происходит единичное измельчение по усталостному механизму на участке от  $d_1$  до  $d_2$ , причем через эту зону максимальных напряжений проходят все крупные частицы. По мере их разрушения накапливаются частицы средних размеров, которые теперь остаются самыми крупными, и наступает измельчение в слое, как по мгновенному, так и по усталостному механизмам в пределах от  $d_2$  до  $d_3$ . Постепенно возрастает доля мелких частиц и начинает реализовываться измельчение в объеме по усталостному механизму в пределах от  $d_3$  до  $d_4$ , которое прекращается после разрушения всех частиц с размерами более  $d_4$ , причем остаются частицы и их осколки с размерами от  $d_4$  до некоторой величины  $d_0$ . Но для частиц с размерами от  $d_6$  до  $d_5$  величина  $\sigma_a > \sigma_y$  и такие частицы агрегируют друг с другом и с более крупными частицами, образуя агрегаты или гранулы, размеры которых возрастают до величины  $d_r$ , после чего  $\sigma_y > \sigma_x$  и гранулы разрушаются. Величина  $d_r$  зависит, кроме всего прочего, от режима обработки и меняется с изменением кривой  $\sigma_y$ . На рисунке  $d_r < d_4$ . Это означает, что после окончания измельчения материал состоит из гранул с размерами, близкими к  $d_r$ , и частиц с размерами от  $d_1$  до  $d_4$ .

Исследования, проведенные для молотильного аппарата зерноуборочного комбайна, также косвенно подтверждают предположение о том, что более мелкие частицы дробятся значительно труднее. Необходимо учитывать и тот факт, что увеличивается парусность измельченных частиц и, следовательно, их скорость. Относительная скорость молотков дробилки и частиц уменьшается, интенсивность удара снижается.

Мельников С.В. и Алешкин В.Р. рассматривают процесс измельчения как стохас-

тический, т.е. случайный во времени. Случайность процесса измельчения обусловлена лабильностью прочностных свойств отдельных зерен, неоднородностью структуры и влажности в связи с чем, число ударов, необходимое для измельчения зерна до определенной степени, является величиной случайной, колеблющейся около какой-то средней величины. В основу закона распределения числа ударов (времени жизни) указанные авторы положили математическую модель процесса, данную Кэптейном, где случайная величина числа ударов  $x(t)$ , необходимых для достижения степени измельчения  $i$ , имеет логарифмически нормальное распределение.

Числовые характеристики логарифмически нормального закона распределения находятся на основе теории надежности, из которой известно, что уравнение:

$$P'(t) = -\gamma P(t)$$

соответствует тому случаю, когда вероятность возникновения повреждения в системе за время от  $t$  до  $t + \Delta t$  может быть представлена выражением:

$$\gamma = \lambda(t) \Delta t + O(\Delta t),$$

где  $\lambda$  - константа процесса, характеризующая среднюю скорость повреждения в системе или, для случая дробления, - характеризующая интенсивность процесса измельчения;

$O(\Delta t)$  - величина порядка малости выше  $\Delta t$ , т. е. при  $t \rightarrow 0$  эта величина стремится к нулю быстрее, чем  $\Delta t$ ;

$P(t)$  - вероятность отсутствия повреждения в системе за период времени от 0 до  $t$ .

Применительно к процессу измельчения в молотковой дробилке можно допустить, что вероятность измельчения  $\gamma$  материала оценивается выражением:

$$\gamma = [\lambda / (t+1)] \cdot (\Delta t + O(\Delta t)).$$

Из уравнения видно, что по мере измельчения материала величина  $\gamma$  уменьшается, т.е. сопротивление размолу возрастает,

Физически это явление объясняется не только приведенными выше причинами, но и изменением аэродинамических характеристик частицы. Резкое снижение скорости воздушного потока, необходимого для перемещения частиц, при уменьшении до 1500 микрон среднего диаметра частицы вызывает резкое увеличение их абсолютной скорости, под действием тангенциальной составляющей аэродинамического потока внутри камеры. Относительная скорость молотков и измельченных частиц резко уменьшается, что приводит к снижению интенсивности ударов.

Геометрическая вероятность соударения частиц с пакетом молотков определялась В.Р. Алешкиным, который предложил следующее выражение для определения вероятности соударения частиц с пакетом молотков:

$$P = k (v + d) / B,$$

где  $k$  – число молотков;  
 $B$  – ширина пакета молотков;  
 $v$  – толщина полотна;  
 $d$  – диаметр частицы.

Так как диаметр частицы „ $d$ ” уменьшается, то следовательно, уменьшается и вероятность соударения частиц с молотком.

Уравнение кинетики измельчения материала в молотковой дробилке, показывающее изменение степени измельчения и суммарного остатка на контрольном сите во времени, может быть представлена в виде:

$$R_x = 100 \exp \left[ - \int_a^t \lambda (t) dt \right],$$

где  $R_x$  - суммарный остаток на сите в %  
 $\lambda (t)$  - произвольная функция времени определяющая скорость разрастания совокупности и зависящая от интенсивности режима и размалываемости материала.

В.Р. Алешкиным, а позднее А.И. Багаевым проводились опыты на молотковой дробилке ДКУ-М с целью подтверждения вышеприведенных положений

Анализ экспериментальных данных позволяет сделать вывод, что наибольшая скорость дробления соответствует начальному моменту загрузки, когда материал в дробильной камере практически полностью представлен целыми (нераздробленными) зернами. Кроме того, в молотковой дробилке неограниченное возрастание времени при дроблении в глухо закрытой камере не приводит к возрастанию степени помола, то есть можно достичь только вполне определенной ее величины,

При непрерывном процессе дробления частицы, по мере измельчения до определенной степени, удаляются из камеры, а на их место поступают неизмельченные. В статическом режиме работы должно соблюдаться равенство масс отводимых измельченных частиц и поступающих неизмельченных частиц.

Таким образом, в дробильной камере в любой момент времени находятся частицы различной величины, но наиболее интенсивно дробятся целые зерна и крупные частицы.

В общем случае можно принять, что скорость дробления находится в функциональной зависимости от количества целого зерна в дробильной камере:

$$q_{др.} = a \cdot m_{ц.},$$

где  $q_{др.}$  – скорость дробления зерна, кг/сек;  
 $a$  – коэффициент пропорциональности, 1/сек;  
 $m_{ц.}$  – масса нераздробленного зерна, кг.

Коэффициент пропорциональности „ $a$ ” весьма сложен по структуре и определяется видом и качеством измельчаемого материала, режимом измельчения, типом машины, многочисленными технологическими и конструктивными факторами.

Для вывода уравнения динамики молотковой дробилки можно принять, с некоторым допущением, величину коэффициента „ $a$ ” постоянной.

#### **Скорость эвакуации измельченного материала из дробильной камеры**

Одним из основных элементов современных дробилок замкнутого типа является перфорированная поверхность решета, выполняющая несколько функций.

Важнейшими функциями следует считать ее участие в дроблении материала и регулирование тонкости помола. Доля участия решета в дроблении материала определяется конфигурацией и состоянием кромок отверстий. Тонкость помола (средний диаметр измельченных частиц) определяется размерами отверстий решета и их конфигурацией. Производительность и эффективность работы дробилки зависит от размеров живого сечения решета, аэродинамического режима внутри камеры, диаметра камеры, скорости вращения ротора и расстояния от концов молотков до поверхности решета,

Работа решет дробилок значительно отличается от работы решет зерноочистительных машин. Самым существенным отличием в условиях работы решет является большая скорость материального слоя внутри рабочей камеры дробилки. Характер движения слоя и отдельных частиц имеет решающее значение для сепарации измельченных сыпучих тел, в связи с чем, для ориентировочной оценки отдельных элементов этого движения можно воспользоваться законами гидромеханики вязкой жидкости.

*В литературе отсутствуют какие-либо теоретические положения о кольцевом движении сыпучих тел, в связи с чем, для*

ориентировочной оценки отдельных элементов этого движения можно воспользоваться законами гидромеханики вязкой жидкости.

В настоящее время существует несколько гипотез о движении материала в камере.

Б.Л. Ромадин в 1936 г., исходя из предположения о движении частиц материала слоем вдоль внутренней поверхности решета, пришел к выводу, что частицы в основном проталкиваются через отверстия решета непосредственно вращающимися молотками.

Другую гипотезу предложил Б.В. Березин в 1957 г. Сущность ее заключается в следующем, отскакивающие после удара молотками от решета и деки частицы проникают на некоторое расстояние к центру ротора. Новые удары молотков по этим частицам вовлекают их в круговое вращательное движение вместе с ротором. Частицы, попавшие к центру, под действием центробежных сил сначала замедляют свое движение, а затем начинают обратное движение к периферии, где снова попадают под удары молотков и т.д.

Основываясь на этих рассуждениях, Б.В. Березин предлагает формулу для определения максимального диаметра частицы, которая может пройти через заданное отверстие решета:

$$D \gg (u_{\text{окр}} \cdot d / u_{\text{рад}}) + d \text{ или } D \geq [R \cdot d / \sqrt{(R_0^2 - r_0^2)}] + d,$$

где  $D$  – диаметр отверстия решета;

$u_{\text{окр}}$  – окружная скорость по концам молотков;

$R_0$  – радиус ротора;

$r_0$  – радиус от центра ротора до окружности на которую залетают частицы при отражении от решета;

$d$  – диаметр проходовой части;

$u_{\text{рад}}$  – радиальная скорость частицы у решета.

Н.Ф. Игнатъевский дополняет картину движения материала в дробильной камере, полагая, что при общем круговом движении частиц они еще движутся и по ширине камеры, т.е. частицы в камере под действием молотков и аэродинамического поля совершают сложное параболическое движение в трехмерном пространстве.

И.К. Соловьев выводит уравнение для приближенного определения скорости слоя в любой точке кольца:

$$u = (a \cdot R^2 + b) / R,$$

где  $a$  и  $b$  – постоянные коэффициенты, характеризующие конструктивные параметры молотковой дробилки и физико-механические свойства измельченных материалов;

$R$  – радиус слоя во вращающемся кольце измельчаемого продукта.

Из уравнения находится зависимость между угловой скоростью  $\omega_1$  периферийного слоя и угловой скоростью  $\omega_2$  частиц, движущихся вместе с кромками молотков:

$$\omega_2 = 2 \kappa \omega_1 R^2 / (R_2^2 + R_1^2) \\ \text{или } \omega_2 = \kappa \omega_1 R_1 / (R_1 + \delta),$$

где  $R_1$  – радиус ротора;

$R_2$  – радиус камеры дробления;

$\delta$  – клиренс;

$\kappa$  – коэффициент, характеризующий тип дробилки и измельчаемый продукт.

Из формулы следует, что с увеличением зазора „ $\delta$ ” между концами молотков и решето скорость периферийного слоя уменьшается. При этом измельчающий эффект рабочих органов уменьшается и увеличивается пропускная способность решета.

Так как просеиваемость решета связана с беспорядочным движением частиц, то и проход частицы через решето рассматривается как случайный процесс. Для определения закономерности прохода частиц через решето, В.Р. Алешкиным введено понятие "испытание на проход", под которым подразумевается факт отражения частицы пакетом молотков на решето. Частица может попасть в отверстие и пройти через него, а может удариться в тело решета.

Геометрическая вероятность прохода частицы определяется как отношение площади отверстий к площади всего решета

$$\phi = F_{\text{отв}} / F_{\text{реш}},$$

где  $F_{\text{отв}}$  – суммарная площадь отверстия решета;

$F_{\text{реш}}$  – площадь решета;

$\phi$  – коэффициент живого сечения решета.

Но частица, попадая в отверстие решета, может не пройти через него, а отразиться от кромки отверстия. Принимая во внимание тот факт, что вероятность прохода частицы зависит от угла падения частицы на решето, толщины решета и округлости отверстия, Алешкин В.Р. приводит формулу вероятности прохода частицы через решето:

$$P = \phi [1 - 1 / (2D / d - 1 / \sin \phi)] \cdot \pi / 4.$$

Данное выражение показывает, что просеиваемость частиц проходовой фракции тем выше, чем больше диаметр отверстий решета, чем больше коэффициент живого сечения

и чем больше угол падения частицы приближается к 90°.

Так как при заданном модуле помола нельзя увеличивать диаметр отверстия решета, то для увеличения просеиваемости следует по мере возможности увеличивать живое сечение решета. Угол падения частиц на решето во многом определяется геометрической формой концов молотков,

На практике замечено, что при некотором износе молотков производительность дробилки увеличивается с одновременным увеличением крупности помола. Это, вероятнее всего, объясняется тем, что затупленные концы молотков отбрасывают измельчаемые частицы под большим углом наклона к решету. Такой же эффект наблюдается и при установке молотков особой конструкции предложенных Сыроватко В.И. Уменьшение диаметра камеры дробления также приводит к увеличению угла падения частицы на решето. Рассмотренные факторы, определяющие производительность решета при работе дробилки, не изменяются, и потому их можно считать постоянными. Кроме постоянных факторов, производительность решета зависит от изменяющихся во времени величин. К таким величинам следует отнести: общее количество материала в дробильной камере, количество частиц проходовой фракции и вентиляционный режим.

Из всех действующих на движущуюся в слое частицу сил при рассмотрении вопроса просеиваемости интерес представляют только те, которые прижимают частицу к поверхности решета. Таких сил три: сила тяжести столбика продукта, лежащего над частицей, центробежная сила и радиальная составляющая динамического напора воздушного потока. В режимах от холостого хода до номинальной загрузки увеличение толщины слоя пропорционально увеличению силы тяжести столбика. Следовательно, при допущении о равномерности вращающегося продуктово-воздушного слоя, можно с достаточной степенью точности допустить, что скорость выхода измельченных частиц через решето пропорциональна - загрузке дробилки материалом.

Однако, выйти через отверстие решета может только частица, измельченная до определенной степени. Введя понятие "эффективность просеивания", под которым понимается отношение количества материала, прошедшего через решето к начальному количеству проходowego материала в камере, можно выразить скорость просеивания:

$$dD_p / dt = D_0 \text{Le}^{-\lambda t},$$

где  $D_0$  - количество материала, прошедшего через решето.

"Испытание на проход", по мнению Алешкина, В.Р. производится за счет ударов молотками по частицам материала, но большую роль в этом процессе играет и воздушный поток.

Ротор дробилки создает достаточно мощный воздушный поток внутри камеры дробилки, за счет чего возникает разность давлений между внутренней и внешней поверхностью решета.

Исследования Игнатъевского Н.Ф. аэродинамических характеристик измельчаемых материалов показали, что при уменьшении частиц ячменной дерти до 1500-микрон скорость их витания резко снижается. На основании этого можно сделать вывод, что дробленые частицы испытывают большее воздействие со стороны радиальной составляющей воздушного потока, воздушно-продуктовый слой находится в состоянии псевдосжижения, вызванного механическим побудителем, в качестве которого выступают молотки дробилки. Известно, что перемещение частиц в псевдосжиженном слое значительно облегчено и измельченные частицы с большей вероятностью могут достигать поверхности решета.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что скорость выхода измельченных частиц зависит от конструктивных параметров дробилки, мало изменяющихся в процессе работы, от величины загрузки и количества материала проходовой фракции, т.е. можно в общем виде эту зависимость выразить так:

$$g_{\text{вых.}} = b \cdot m_{\text{др.}} \cdot m_3,$$

где  $g_{\text{вых.}}$  - скорость выхода измельченного материала;

$b$  - постоянный коэффициент;

$m_3$  - количество материала в дробильной камере;

$m_{\text{др.}}$  - количество материала проходовой фракции в камере.

В настоящее время трудно без проведения дополнительных исследований точно определить значение постоянного коэффициента "  $b$  ".

Однако, полученное выражение можно использовать для описания в общем виде динамических свойств дробильной камеры.

#### **Вывод:**

Исходя из следующих заключений:

а) в связи с недостаточной силой ударных воздействий на зерно, являющейся следствием многих факторов:

- наличия при измельчении, по большей части, нецентральных ударов;
- постепенного уменьшения массы измельчаемого продукта;
- низкой скорости ударов;
- придаваемого зерну дополнительно вращательного движения

разрушение происходит в результате многократных ударов, число которых индивидуально для каждого измельчаемого зерна в отдельности;

б) неограниченное увеличение времени дробления зерна в камере молотковой дробилки не приводит к возрастанию степени помола;

в) наибольшей скорости дробления соответствует начальный момент загрузки, когда материал в дробильной камере практически полностью представлен нераздробленными зернами.

Можно предположить, что при непрерывном процессе дробления баланс экспериментально выявленных масс отводимых - измельченных и поступающих - неизмельченных частиц будет способствовать повышению скорости дробления и выхода измельченных частиц через решето, а так же уменьшению энергозатрат.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Багаев А.И. Исследование динамических характеристик молотковой кормодробилки как объекта автоматического регулирования. Автореферат. Ленинград – Пушкин. 1971.
2. Степук Л.Я. Механизация дозирования и кормоприготовления. Минск: Урожай, 1986.
3. Андронов В.В. Динамика систем с преобразованным сухим трением. - Диссертация ... д-ра технических наук. – М., 1984.
4. Блехман И.И., Джанелидзе Г.Ю. Вибрационное перемещение. – М.: Наука, 1964.
5. Ротенберг А.В. Применение аппарата классической статистики в равновесной механике дискретных сред // Технологии и системы обработки информации и управления. – Пенза: ПГУ, 1999. – Вып.2. – С.72.