

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРАВНОВЕШЕННОСТИ МОЛОТКОВ

Окружная скорость молотков в дробилках – один из главных факторов, определяющих эффективность рабочего процесса.

Для достижения наилучших показателей работы дробилки окружная скорость молотков должна быть увязана с другими факторами: зазор между концами молотков и решетом, количеством молотков, относительной влажностью перерабатываемого продукта, его прочностью и т.д.

С возрастанием окружной скорости молотков удельные затраты энергии на процесс снижаются, но до определённого значения, так как резко увеличиваются затраты энергии на вентиляцию (ротатор дробилки работает подобно вентилятору). Наряду с этим, повышение скорости

молотков наиболее сильное влияние оказывает на интенсификацию диспергирования, вызывая при этом переизмельчение части материала.

Зазор между концами молотков и решета определяет собой вместимость рабочей камеры, и если он окажется недостаточным, то увеличение скорости молотков повлияет главным образом на степень измельчения. Следовательно, при увеличении скорости требуется увеличивать и зазор.

При определении скорости соударения молотка с зерном, при которой оно гарантированно бы разрушалось за один удар (разрушающая скорость), В. П. Горячкин рекомендовал опираться на теорию колебаний тел при ударе и на основе теории контактных напряжений Герца определять предельную скорость $v_{уд}$ по формуле

$$v_{уд} = \frac{\sigma_{раз} \sqrt{\frac{E}{\rho}}}{E}, \quad (2.13)$$

где $\sigma_{раз}$ – разрушающее напряжение, Па; E – модуль упругости зерна, Па; $C_0 = \sqrt{E/\rho}$ – скорость распространения упругих волн напряжений (скорость распространения звука), м/с; ρ – плотность зерна, кг/м³.

Расчёты по формуле (2.13) дают большое расхождение между фактическими и рабочими скоростями в дробилках (примерно в 8 – 15 раз значения $v_{уд}$ по (2.13) меньше фактических скоростей).

Эта разница объясняется тем, что теория Герца рассматривает напряжённое состояние тел лишь в пределах упругих деформаций и не касается явлений, протекающих за пределами упругости материала.

В действительности при ударе в точке соударения тел возникают напряжения, которые распространяются не мгновенно, а с конечной скоростью в виде волн напряжений. Отражение возмущений от граничных поверхностей вызывает колебания и вибрацию в телах. В зависимости от силы удара волны напряжений могут быть упругие, при которых деформации подчиняются закону Гука, и пластические (разрушающие), при которых напряжения в теле превосходят предел упругости.

Для определения разрушающей скорости рассматриваются пластические волны напряжений, распространяющиеся вдоль зерна при соударении о жёсткую преграду при допущении, что зерно имеет форму цилиндрического стержня (рис. 2.4) длиной a и площадью сечения F_0 .

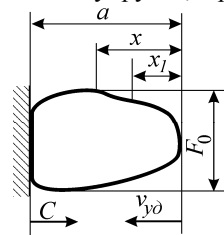


Рис. 2.4. Схема удара зерна о преграду

При решении задачи используют метод жёсткопластического анализа, в основе которого рассматривается не сам процесс деформирования, включая и упругие деформации, а лишь его остаточное состояние.

Составим уравнение движения недеформированной части стержня (зерна) после удара:

$$\rho x F_0 \frac{du}{dt} = \sum P, \quad (2.14)$$

где ρ – плотность материала (предполагается постоянной), кг/м^3 ; x – расстояние от свободного конца зерна до упругопластической зоны, м ; t – время, с ; $\sum P = -\sigma_S F_0$ – равнодействующая всех приложенных сил, включая и силу реакции отделяющейся массы, Н ; σ_S – пластическое напряжение, возникающее в теле при разрушении, Па .

Подставляя в (2.14) значение $\sum P$, получим

$$\rho x \frac{du}{dt} = -\sigma_S. \quad (2.15)$$

Из рисунка 2.4 видно, что одновременно происходит деформация зерна (изменение его длины), которую можно описать уравнением $dx/dt = -(u + C)$, откуда $dt = -dx/(u + C)$.

Подставляя значение dt в (2.15) и разделяя переменные, получим

$$\rho(u + C) du = \frac{\sigma_S dx}{x}. \quad (2.16)$$

Здесь x изменяется от a до x_1 , где x_1 – величина недеформированной части зерна. Интегрируя это уравнение в указанных пределах и заменяя σ_S на $\sigma_{\text{вд}}$ – напряжение, при котором происходит разрушение зерна в динамических условиях (определяется экспериментально), получим

$$\sigma_{\text{вд}} = \frac{\rho(v_{\text{уд}}^2 + 2Cv_{\text{уд}})}{2 \ln\left(\frac{a}{x_1}\right)}, \quad (2.17)$$

где C – скорость распространения пластической волны напряжений в сторону недеформированной части тела, которая находится по времени соударения, считая движение зерна после удара равнозамедленным, м/с . За время соударения она пройдёт путь $S = v_{\text{уд}} t / 2 = a - x_1$.

Отсюда $t = 2(a - x_1)/v_{уд}$, но за это время зерно деформируется со скоростью C на величину $(a - x_1)$. Приравнивания их, получим $2(a - x_1)v_{уд} = (a - x_1)/C$, или $C = v_{уд}/2$. Подставляя значение C в (2.17), имеем

$$\sigma_{вд} = \frac{\rho v_{уд}^2}{\ln\left(\frac{a}{x_1}\right)}. \quad (2.18)$$

Испытания прочности зерна в статических и динамических условиях показали, что динамический предел прочности больше статического и их соотношение выражается коэффициентом динамичности $k_d = \sigma_{вд}/\sigma_{в.ст} = 1,4...2,0$, где $\sigma_{в.ст}$ – предел прочности в статических условиях, Па.

С подстановкой соответствующих значений получаем выражение для разрушающей скорости

$$v_{раз} = \sqrt{\frac{k_d \sigma_{в.ст} \ln\left(\frac{a}{x_1}\right)}{\rho}}. \quad (2.19)$$

По экспериментальным данным С. В. Мельникова, для зёрен ячменя «Винер» с относительной влажностью 10...12% имеем $\rho = 1320 \text{ кг/м}^3$; $\sigma_{в.ст} = 7 \text{ МПа}$; $k_d = 1,8$; $a/x_1 = 1,8$ (т.е. зерно разламывается примерно пополам).

Кроме того, только с позиций волновой теории распространения напряжений можно объяснить такие явления ударного разрушения кормов, как откальвание хвостовой части зерна при условии, что зерно ударилось о преграду «носиком». При ударе «носиком» по телу зерна пройдёт волна напряжений сжатия и, дойдя до хвостовой части, отразится и пойдёт обратно в виде волны растяжения. Поскольку зерновые корма относятся по характеру разрушения к хрупким телам, у которых предел прочности на растяжение в 5 – 10 раз меньше предела прочности на сжатие, то по слабому месту и произойдёт откальвание хвостовой части зерна, отражённой волной растяжения даже при относительно слабом ударе.

Рабочие скорости молотков в дробилках не обеспечивают условия для однократного разрушения зерна в силу того, что в дробильной камере воздушно-продуктовый слой вращается по периферии ротора и

действительная скорость соударения молотков с зерном будет меньше. Поэтому скорость молотков для достижения однократного разрушения должна быть

$$v_M = v_{\text{раз}} + v_{\text{сл}} = v_{\text{раз}}(1 + \beta_{\text{сл}}), \quad (2.20)$$

где $v_{\text{сл}}$ – скорость циркуляции воздушно-продуктового слоя, м/с;

$$\beta_{\text{сл}} = v_{\text{сл}}/v_{\text{раз}} = 0,4 \dots 0,5.$$

Из описания рабочего процесса дробилки известно, что в действительности в камере имеет место многократное ударное воздействие молотков на материал, поэтому рабочие скорости можно принимать несколько меньшими.

Если в (2.19) принять размер x_1 за средний размер частиц, получаемых в результате однократного воздействия, т.е. $x_1 = d_{\text{ср}}$, а размер зерна a выразить через эквивалентный диаметр, то можно записать $a = 2,25D_9$, $a/x_1 = 2,25D_9/d_{\text{ср}} = 2,25\lambda$.

Прологарифмировав правую часть последнего выражения, получим $\ln 2,25\lambda = 0,81 + 2,3 \ln \lambda$.

Обозначив в (2.19) $k_3 = k_d \sigma_{\text{в.ст}}/\rho$, получим выражение для определения разрушающей скорости $v'_{\text{раз}}$ молотков при многократном воздействии на материал

$$v'_{\text{раз}} = \sqrt{k_3(0,81 + 2,3 \ln \lambda)}. \quad (2.21)$$

Число ударов $z_{\text{уд}}$ определённой интенсивности, которое требуется нанести по зерну для получения заданной степени измельчения λ , можно определить по формуле

$$z_{\text{уд}} = a/(a - x_1) = \lambda/(\lambda - 0,445).$$

Дробильный барабан с шарнирно-подвешенными молотками представляет собой квазиупругую динамическую систему, обладающую «податливостью» звеньев, так как молотки имеют две степени свободы. Шарнирно подвешенный молоток дробилки работает по принципу физического маятника, прикрепленного к быстровращающемуся диску барабана в поле восстанавливающих центробежных сил переносного вращательного движения, и трением в шарнире.

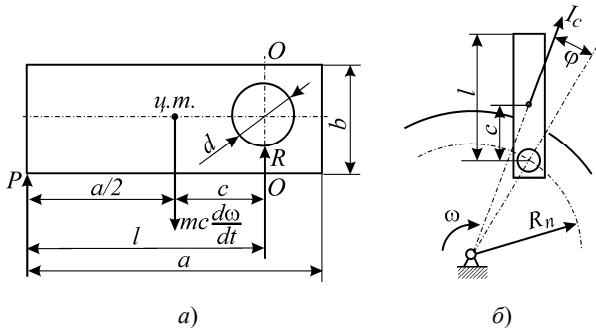


Рис. 2.5. Силы, действующие на молоток (а), и схема работы молотка (б)

Анализ движения молотка показывает, что реакция от ударных импульсов не будет передаваться от молотка на палец, а через него и на подшипники вала ротора, если ось шарнира молотка совпадает с центром её качения. При неправильном подвесе молотков реакция удара вызывает вибрацию дробилки и повышенный износ подшипников вала ротора.

Рассмотрим схему сил, действующих на молоток с одним отверстием в рабочем процессе (рис. 2.5, а). Если учесть, что удары по материалу молоток наносит своим внешним концом, то с небольшой погрешностью за центр удара можно принять точку пересечения продольной осевой линии молотка с его внешней гранью. Помимо ударной силы P (точнее, реакции от удара), действует инерционная сила $mc d\omega/dt$ и сила реакции шарнира R . Трением молотка о слой материала пренебрегаем.

В случае равновесия молотка сумма проекций сил на ось $O-O$ и сумма моментов относительно оси шарнира равны нулю, т.е.

$$\frac{mcd\omega}{dt} - P + R = 0, \quad \frac{Jd\omega}{dt} - Pl = 0, \quad (2.22)$$

где c – расстояние от оси подвеса до центра тяжести молотка, м; l – расстояние от оси подвеса до наружной грани молотка, м; m – масса молотка, кг; $d\omega/dt$ – угловое ускорение молотка во время удара c^{-2} ; J – момент инерции молотка; $mcd\omega/dt$ – сила инерции молотка, кг·м/с²; $mc d\omega/dt$ – ускорение в центре тяжести молотка, м/с².

Подставляя значение силы P (2.22) из первого выражения во второе, получим $R = (J/l - mc)d\omega/dt$. Отсюда следует, что независимо от

силы удара и углового ускорения реакция шарнира R равна нулю при условии $J/l - mc = 0$. Если $J = m\rho^2$, где ρ – радиус инерции молотка относительно оси шарнира, м, то

$$\rho^2 = cl. \quad (2.23)$$

В (2.23) расстояние l называют приведённой длиной физического маятника. Молотки, удовлетворяющие условию (2.23), называются «уравновешенные на удар».

Пренебрегая площадью отверстия, для молотка в виде прямоугольной пластины

$$\rho_0 = \frac{a^2 + b^2}{12}, \quad (2.24)$$

где ρ_0 – радиус инерции молотка относительно центра тяжести, м.

Радиус инерции относительно оси шарнира (при параллельном переносе осей) $\rho_0^2 = \rho^2 + c^2 = (a^2 + b^2)/12 + c^2$.

Если удар приходится на конец молотка, то $l = c + a/2$ и подставляя значения c и l в (2.23), получим

$$c = \frac{a^2 + b^2}{6a}, \quad (2.25)$$

где a – длина молотка, м; b – ширина молотка, м.

Для молотков такой же формы, но с двумя отверстиями диаметром d это расстояние равно

$$c = \frac{A}{2} + \sqrt{\frac{A^2}{4} + B}, \quad (2.26)$$

где $A = a^2b/\pi d^2 - a/2$, $B = ab(a^2 + b^2)/6\pi d^2 + d^2/8$.

При ударе по кускам молоток в некоторых случаях может совершать колебания на некоторый угол φ относительно оси шарнира (рис. 2.5, б). Это вызывает изменение момента инерции барабана и его неравномерность вращения.

Для обеспечения устойчивости движения молотка рекомендуется подбирать размеры молотка l и радиус подвеса молотка R_{Π} по условию

$$R_{\Pi} = 2,25l, \quad R_{\Pi} = 4l. \quad (2.27)$$