

## К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВРЕМЕНИ УДАРА И МОЩНОСТИ ДЕЗИНТЕГРАТОРА, РАСХОДУЕМОЙ НА ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ ПРИ УДАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

doctor\_cement@mail.ru

*В статье рассмотрен аналитический метод расчета мощности, расходуемой дезинтегратором на ударное измельчение материала. В методике приведены основные выражения для определения времени действия ударной нагрузки, которая сообщается рабочим элементом ротора частицы (куску) измельчаемого материала. Получены зависимости времени удара и мощности, расходуемой дезинтегратором на удар, в зависимости от физико-механических характеристик измельчаемого материала.*

**Ключевые слова:** дезинтегратор, удар, время удара, энергия удара, работа сил ударного взаимодействия.

Рядом ученых [1-4] предложены методики расчета энергетических и технологических параметров различных мельниц ударного действия. Существующие подходы к расчету мощности ударных мельниц преимущественно зависят от их конструктивных особенностей и в полной мере не являются универсальными для других технических решений. Нами предложена методика расчета мощности дезинтегратора [5], которая расходуется на измельчение посредством ударного воздействия. Во всех конструкциях дезинтеграторных мельниц материал преимущественно измельчается ударным (короткоимпульсным) воздействием за элементарно малый промежуток времени, так как частоты вращения роторов мельницы составляет около  $6000 \text{ мин}^{-1}$ , а иногда и более [4].

Во время соударения ударного элемента ротора с частицей (куском) измельчаемого материала происходит деформация (чаще всего разрушение вследствие деформации) частицы (куска), а также ударного элемента [6]. Естественно, что деформация ударного элемента в месте соударения с частицей (куском) значительно меньше, чем деформация измельчаемой частицы (куска). Связано это с тем, что молекулярная оболочка ударного элемента образует тело гораздо больших размеров, чем сама частица. На основании вышесказанного будем считать, что ударный элемент абсолютно жесткий, поэтому деформация при соударении происходит только самой частицы.

В соответствии с работами [6, 7] время удара  $\tau_{y\partial}$  равно четверти периода  $T$  гармонических колебаний частицы материала с жесткостью, равной жесткости материала:

$$\tau_{y\partial} = 0,25T, \quad (1)$$

где  $T$  – период гармонических колебаний частицы материала с жесткостью, равной жесткости материала, с.

Период гармонических колебаний частицы материала можно определить по формуле:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0}, \quad (2)$$

здесь  $\omega_0$  – циклическая частота деформации частицы (куска) при ударе,  $\text{с}^{-1}$ , определяемая по формуле:

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m}, \quad (3)$$

где  $k$  – жесткость материала частицы,  $\text{Н/м}$ ;

$m$  – масса частицы (куска) измельчаемого материала,  $\text{кг}$ , для сферической частицы определяемая по формуле [7]:

$$m = \frac{4}{3}\pi \cdot r^3 \cdot \rho, \quad (4)$$

здесь  $r$  – радиус измельчаемой частицы (куска) материала,  $\text{м}$ ;

$\rho$  – плотность частицы (куска) измельчаемого материала,  $\text{кг/м}^3$ .

В соответствии с (2) можно записать:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T}, \quad (5)$$

Согласно основным положениям волновой теории удара [7] во время соударения  $\tau_{y\partial}$  скорость распространения ударных волн определяется инертными и упругими свойствами дисперсной среды. Скорость распространения  $v_{y.e.}$  продольных упругих волн (импульсов) в любой безграничной однородной среде можно определить по формуле:

$$v_{y.e.} = \sqrt{\frac{B}{\rho_c}}, \quad (6)$$

где  $B$  – модуль всестороннего сжатия (растяжения), отличающийся от модуля упругости  $E$  материала величиной относительной деформации, в данном случае, когда деформация материала частицы много больше деформации материала ударного элемента, можно принять  $B = E$ , МПа;

$\rho_c$  – плотность среды, в которой распространяются ударные волны, кг/м<sup>3</sup>, в нашем случае  $\rho_c = \rho$ .

В соответствии с физическим смыслом импульса силы запишем:

$$S = \int_{\Delta t} F_{y\partial} dt, \quad (7)$$

где  $S$  – импульс силы удара,  $\frac{кг \cdot м}{с}$ , определяемый из выражения:

$$S = m_y \cdot v_{y.в.}, \quad (8)$$

здесь  $m_y$  – масса ударного элемента, кг;

$v_{y.в.}$  – скорость распространения импульса

силы (ударной волны), м/с;

$F_{y\partial}$  – сила удара, Н;

$t(\tau_{y\partial})$  – время действия ударного импульса (время удара), с.

После интегрирования (7), подставив правую часть выражения (8) и выразив из (7) силу удара  $F_{y\partial}$ , получим:

$$F_{y\partial} = \frac{m_y \cdot v_{y.в.}}{\tau_{y\partial}}, \quad (9)$$

Жесткость материала можно определить по формуле [7]:

$$k = \frac{F_{y\partial}}{\Delta l} = \frac{F_{y\partial}}{l}, \quad (10)$$

где  $\Delta l$  – деформация частицы при ударе, м.

Модуль упругости  $E$  можно рассматривать, как напряжение, возникающее в частице (куске) материала. Тогда  $\Delta l = l$ , где  $l$  – линейный размер частицы, который равен двум величинам радиусов частицы:

$$l = 2r, \quad (11)$$

После подстановки в уравнение (10) выражений (9) и (11) оно примет вид:

$$k = \frac{m_y \cdot v_{y.в.}}{2\tau_{y\partial} \cdot r}, \quad (12)$$

Теперь произведем подстановку правых частей выражений (4), (5) и (12) в (3), получим:

$$\frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{3m_y \cdot v_{y.в.}}{8\tau_{y\partial} \cdot r^4 \cdot \pi \cdot \rho}}, \quad (13)$$

После несложных математических преобразований уравнения (13), заменив  $v_{y.в.}$  правой частью выражения (6), выражаем период  $T$  гармонических колебаний ударной волны в зависимости от физико-механических характеристик среды (измельчаемого материала):

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{3m_y \cdot v_{y.в.}}{8\tau_{y\partial} \cdot r^4 \cdot \pi \cdot \rho}}}, \quad (14)$$

Подставляя (14) в (1), получим выражение для определения времени удара рабочего элемента дезинтегратора в зависимости от физико-механических свойств измельчаемого материала:

$$\tau_{y\partial} = \frac{0,5\pi}{\sqrt{\frac{3m_y \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}}{8\tau_{y\partial} \cdot r^4 \cdot \pi \cdot \rho}}}, \quad (15)$$

После алгебраических преобразований выражения (15) получим окончательное выражение для определения времени удара:

$$\tau_{y\partial} = \frac{2\pi^3 \cdot r^4 \cdot \rho^{3/2}}{3m_y \cdot \sqrt{E}}, \quad (16)$$

На основании работ [3-4] скорость частицы, приобретенная ей после столкновения с соответствующим рядом ударных элементов, будет равна:

$$v_n = \omega \cdot r_0 \sqrt{1 \pm \left(1 - \frac{r_1 \sin \alpha}{r_0}\right)}, \quad (17)$$

где  $n$  – номер ряда ударных элементов,  $n = 1, 2, 3, \dots$ ;

$\omega$  – угловая скорость вращения ротора дезинтегратора, рад/с;

$r_0$  – радиус от оси вращения до точки соударения частицы с ударным элементом, м;

$r_1$  – радиус (линейный размер) ударного элемента, м;

$\alpha$  – угол атаки частицы ударным элементом, град.

С учетом конструктивных особенностей расположения ударных элементов время удара можно определить из модифицированного выражения (17):

$$\tau_{y\partial} = \frac{2\pi^3 \cdot r^4 \cdot \rho}{3m_y \cdot \omega \cdot r_0 \sqrt{1 \pm \left(1 - \frac{r_1 \sin \alpha}{r_0}\right)}}, \quad (18)$$

Полученное выражение (16) устанавливает изменение времени удара ударного элемента ротора дезинтегратора по среде (слою) измельчаемого материала и учитывает характеристику среды. Выражение (16) применимо для обобщенного подхода к определению энергетических характеристик процесса измельчения в дезинтеграторах.

Зависимость времени удара  $\tau_{y\partial}$  от частоты вращения роторов графически представлена на рис. 1.

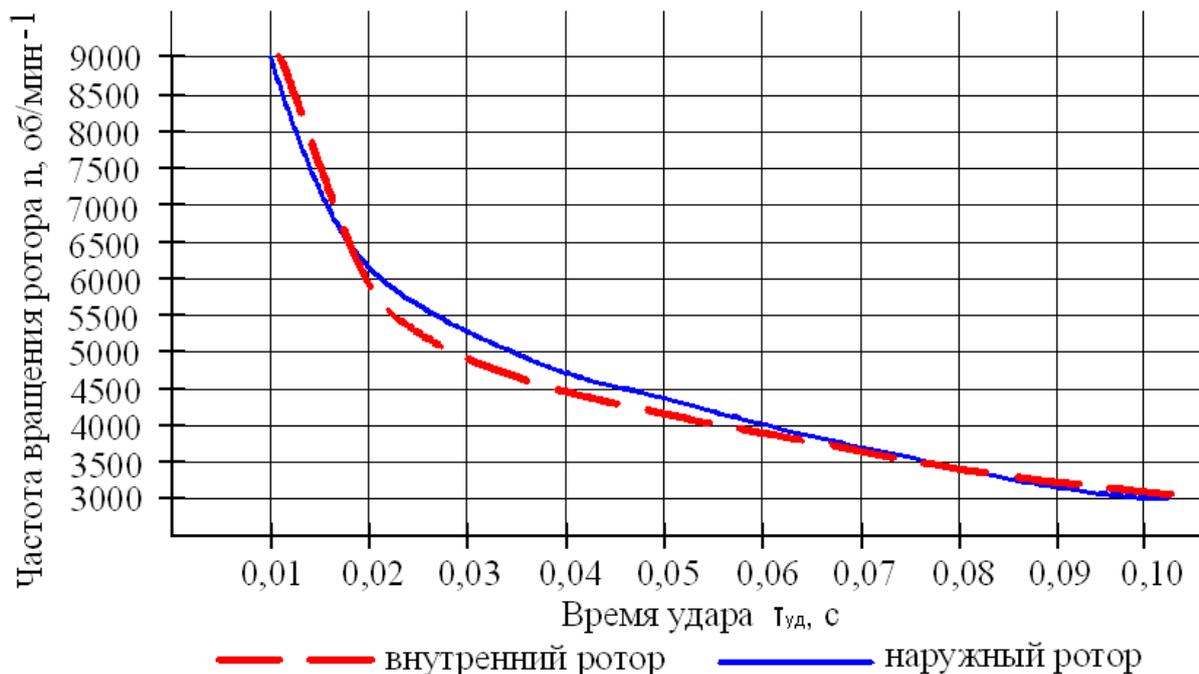


Рисунок 1. Графическая зависимость времени удара  $\tau_{y\partial}$  от частоты вращения роторов  $n$

Выражение (18) дает возможность оценки времени удара для разрушения частиц (кусков) материала на каждом из рядов ударных элементов дезинтегратора.

Анализ современных работ [1-4,6] доказал, что особенности измельчения и механической активации веществ в таких энергонапряженных измельчительных устройствах, как дезинтеграторы, исследованы недостаточно. Скорости соударений (порядка 100 – 400 м/с) в этих устройствах обеспечивают высокий уровень напряжений в частицах (кусках) измельчаемого материала, а относительно малые времена обработки (порядка 0,01 – 0,1 секунды) – необходимую производительность. Учитывая то, что частица измельчаемого материала находится в камере помола дезинтегратора столь малое время и испытывает некоторое количество соударений, равное числу рядов рабочих элементов, то возможно воспользоваться следующей формулой для определения элементарной мощности, расходуемой дезинтегратором на удар:

$$P_{y\partial} = \frac{dA_{y\partial}}{dt}, \quad (19)$$

где  $t$  – время, за которое совершилась работа по ударному измельчению материала, с;

$A_{y\partial}$  – элементарная работа, затрачиваемая на ударное измельчение материала в дезинтеграторе, Дж, которую можно определить из выражения:

$$A_{y\partial} = \int_{s_1}^{s_2} F_{y\partial} \cdot ds, \quad (20)$$

здесь  $F_{y\partial}$  – сила удара (нормальная реакция), возникающая при соударении частицы с ударным элементом ротора, Н;

$ds$  – перемещение вектора силы удара вдоль линии действия удара, м;

$$ds = v_p(\tau_{y\partial}) \cdot dt, \quad (21)$$

где  $v_p$  – скорость, при которой происходит разрушение частицы материала, м/с.

Подставляя выражение (21) в (20) и интегрируя по времени  $t$ , имеем:

$$A_{y\delta} = \int_{\Delta t} F_{y\delta}(\tau_{y\delta}) \cdot v_p(\tau_{y\delta}) \cdot dt. \quad (22)$$

Для того, чтобы при столкновении частицы (куска) измельчаемого материала с ударным элементом произошло ее разрушение, необходимо сообщить последнему такую энергию, при которой частица (кусок) разрушилась на несколько частей. На основании этого и с учетом обобщенной теоремы Карно о потерянных скоростях при соударении двух тел [7], выражение для определения элементарной энергии ударного разрушения запишется в виде:

$$d\varepsilon_p = \left( \frac{1-e}{1+e} \right) \cdot m_y \cdot v_p \cdot dv_p, \quad (23)$$

где  $e$  – коэффициент восстановления при ударе (для материала частицы), определяется в соответствии с существующей методикой [7];

$m_y$  – масса ударного элемента, кг.

На основании работы [4] в выражение (23) введем безразмерную величину  $\delta$  – доля кинетической энергии от потерянных скоростей движения частицы и ударного элемента роторов – и после некоторых математических преобразований получим:

$$d\varepsilon_p = (1-e^2)\delta \cdot m_y \cdot v_p \cdot dv_p, \quad (24)$$

где  $\delta$  – доля кинетической энергии от потерянных скоростей при столкновении частицы и ударного элемента роторов, определяемая в соответствии с методикой [4]:

$$\delta = \frac{v_1 + v_2}{2v_2}, \quad (25)$$

здесь  $v_1$  – скорость частицы, приобретенная ей столкновением с внешним ротором, м/с;

$v_2$  – скорость частицы, приобретенная ей столкновением с внутренним ротором, м/с.

Интегрируя выражение (23), получим:

$$\varepsilon_p = \frac{(1-e^2)\delta \cdot m_y \cdot v_p^2}{2}. \quad (26)$$

Выражение (26) учитывает только энергетические параметры разрушения материала при ударном измельчении. Для получения полной энергии, необходимой при ударном разрушении материала в дезинтеграторе, нужно учесть физико-механические характеристики измельчаемого материала. При ударном измельчении материалов в процессе разрушения частицы (куска) главную роль играют такие параметры, как

скорость разрушения  $v_p$ , сила удара  $F_{y\delta}$  и время её действия  $\tau_{y\delta}$ .

При условии, что скорость ударной волны равна скорости разрушения,  $v_{y.в.} = v_p$ , выражение для силы удара запишется в виде:

$$F_{y\delta} = \frac{m_y \cdot v_p}{\tau_{y\delta}}, \quad (27)$$

Это выражение показывает, как зависит величина силы удара от скорости разрушения и времени действия ударной нагрузки.

На основании работы [6], запишем выражение для определения силы удара в виде:

$$F_{y\delta} = \frac{2\varepsilon_p \cdot E}{r \cdot \sigma_{сж}}, \quad (28)$$

где  $E$  – модуль упругости материала, МПа;

$r$  – радиус частицы (куска), обрабатываемой в дезинтеграторе, м;

$\sigma_{сж}$  – предел прочности измельчаемого материала на сжатие (растяжение), МПа.

С учетом (26) выражение (28) примет вид:

$$F_{y\delta} = \frac{(1-e^2)\delta \cdot m_y \cdot v_p^2 \cdot E}{r \cdot \sigma_{сж}}. \quad (29)$$

Приравнивая правые части выражений (27) и (30) и выражая из уравнений скорость разрушения, после несложных алгебраических преобразований получим:

$$v_p = \frac{r \cdot \sigma_{сж}}{(1-e^2)\delta \cdot E \cdot \tau_{y\delta}}. \quad (30)$$

Таким образом, получили зависимость скорости разрушения материала в дезинтеграторе, необходимой для измельчения материала ударным воздействием, от физико-механических характеристик сырья и времени ударного взаимодействия.

В соответствии с выражением (22), подставляя в него (27) и (30), получим:

$$A_{y\delta} = \int_{\Delta t} \frac{m_y \cdot r^2 \cdot \sigma_{сж}^2 \cdot dt}{(1-e^2)^2 \delta^2 \cdot E^2 \cdot \tau_{y\delta}^3}. \quad (31)$$

Интегрируя выражение (31) для определения работы сил соударения частицы с ударным элементом, затрачиваемой на ударное измельчение материала, окончательно получим:

$$A_{y\delta} = - \frac{m_y \cdot r^2 \cdot \sigma_{сж}^2}{2(1-e^2)^2 \delta^2 \cdot E^2 \cdot \tau_{y\delta}^2}. \quad (32)$$

Заменяя  $\tau_{y\delta}$  в выражении (32) на (16) и учитывая, что  $v_{y.в.} = v_p$ , получим:

$$A_{y\delta} = - \frac{9m_y^3 \cdot \sigma_{сж}^2 \cdot v_p^2}{8(1-e^2)^2 \delta^2 \cdot E^2 \cdot \pi^6 \cdot r^6 \cdot \rho^2}. \quad (33)$$

Согласно условию, что  $dA_{y\delta} = -d\varepsilon_p$  и используя технологические параметры работы дезинтегратора согласно выражению в [3], получим:

$$P_{y\delta} = \varepsilon_p \cdot n \cdot z, \quad (34)$$

где  $n$  – частота вращения ротора дезинтегратора,  $c^{-1}$ ;

$z$  – количество ударных элементов ротора, шт.

Тогда с учетом (34) выражение (19) для определения мощности, затрачиваемой ротором на ударное измельчение в дезинтеграторе, примет вид:

$$P_{y\delta} = \frac{9m_y^3 \cdot \sigma_{сж}^2 \cdot v_p^2 \cdot n \cdot z}{8(1-e^2)^2 \delta^2 \cdot E^2 \cdot \pi^6 \cdot r^6 \cdot \rho^2} \quad (35)$$

Мощность дезинтегратора, расходуемая на удар, линейно зависит от частоты вращения роторов и нелинейно изменяется в зависимости от физико-механических характеристик измельчаемого материала. Выражение (37) показывает изменение энергии удара от свойств материала и режима работы дезинтегратора.

В результате аналитических исследований изменения мощности, расходуемой на удар, а также времени удара рабочего элемента по частице измельчаемого материала, установлены закономерности влияния физико-механических свойств измельчаемого материала на энергетические параметры работы дезинтегратора.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хинт, И.А. Основы производства силикатных изделий [Текст]/ И.А. Хинт. – М.-Л.: Стройиздат, 1962. – 636 с.
2. Богородский, А.В. Разработка конструкций и методов расчета интенсивных измельчителей дезинтеграторного типа/ А.В. Богородский//Дисс. работа на соискание уч. степени канд. техн. наук.- ИХТИ Иваново, 1982.- 171 с.
3. Семикопенко, И.А. Дезинтеграторы с эксцентричным расположением рядов рабочих элементов/ И.А. Семикопенко//Дисс. работа на соискание уч. степени канд. техн. наук.- БелГТАСМ, Белгород, 1998.- 170 с.
4. Прокопец, В.С. Повышение эффективности дорожно-строительных материалов механоактивационным модифицированием исходного сырья./ Дисс. на соиск. уч. степени докт. техн. наук. бегород, 2005. – 523 с.
5. Пат. 2377070 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В 02 С13/22, Дезинтегратор [Текст]/ А.М. Гридчин, В.С. Севостьянов, Р.В. Лесовик, Е.С. Глаголев, М.В. Севостьянов, А.Е. Качаев, Н.В. Солопов, Н.И. Алфимова; заявитель и патентообладатель Белгород; БГТУ им. В.Г. Шухова.- № 2008118079/03 заявл. 06.05.2008; опубл. 27.12.2009 в Бюлл.. №36.
6. Прокопец, В.С. Математическая модель эффективности механоактивационных процессов в строительных материалах /В.С. Прокопец, Т.Л. Иванова // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2005. № 8. - С. 71-73.
7. Ландау, Л. Д., Лифшиц, Е. М. Механика. — Издание 5-е, стереотипное. — М.: [Физматлит](#), 2004. — 224 с. — («Теоретическая физика», том I).
8. Бонд, Ф.С. Законы дробления.//Труды Европейского совещания по измельчению. – М.: Стройиздат, 1966. – С. 195-205.
9. Румпф, Г. Об основных физических проблемах при измельчении /Труды европейского совещания по измельчению.- М.: Стройиздат, 1966. – С. 7-40.