ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2021;(11-1):179–189
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622 DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_179

ФОРМИРОВАНИЕ РАЗРУШАЮЩИХ НАГРУЗОК В ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ТИПА

С. Г. Фролов[1], Г. А. Усов[1], Л. А. Антропов[1]

[1] Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация: рассмотрены основные моменты математической модели процесса сверхтонкого измельчения твердых материалов в измельчительных машинах центробежного типа, процессы формирования разрушающих нагрузок на измельчаемый материал и выведены основные уравнения движения мелющих тел в форме цилиндра при контакте с разрушаемым материалом. Создана математическая модель процесса сверхтонкого измельчения твердых материалов с различными физико-механическими свойствами в измельчительных машинах центробежного типа с планетарным движением мелющих тел в виде тел вращения. Использовались методы теории машин и механизмов, законы теоретической механики, математическое моделирование и вычислительный эксперимент. Разработаны основы математической модели определения конструктивных и технико-технологических параметров измельчительных машин центробежного типа с планетарным движением мелющих тел в виде тел вращения. Разработана кинематическая схема взаимодействия рабочих органов мельницы с частицами измельчаемого твердого материала в процессе его тонкого и сверхтонкого измельчения с учетом расчетных значений режимных параметров работы измельчительного устройства. Создан алгоритм оптимального управления процессом сверхтонкого диспергирования в измельчительных машинах с планитарным движением мелющих тел. На базе совмещенной системы уравнений составлен алгоритм процесса, позволяющий получить расчетные формулы для проектирования измельчительных машин центробежного типа и управления процессом сверхтонкого измельчения технологических материалов с различными физико-механическими свойствами. Полученные результаты математического моделирования в перспективе будут использованы для расчета новых конструкций измельчительных машин центробежного типа и оптимизации режимов их работы.

Ключевые слова: центробежные мельницы, мелющие тела, математическое моделирование, процесс сверхтонкого измельчения, переизмельчение материала, ультрадисперсные системы.

Для цитирования: *Фролов С. Г., Усов Г. А., Антропов Л. А.* Формирование разрушающих нагрузок в измельчительных машинах центробежного типа // Горный информационно-аналитическийбюллетень.—2021.—№11-1.—С.179–189.DOI:10.25018/0236_1493_2021_111_0_179.

Generation of destructive loads in centrifugal-type milling machines

S. G. Frolov[1], G. A. Usov[1], L. A. Antropov[1]

[1] Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia

© С. Г. Фролов, Г. А. Усов, Л. А. Антропов. 2021

Abstract: The research aimed the mathematical model of ultra-fine milling of solid materials having different physical and mechanical properties in centrifugal milling machines with differentially moving grinding bodies as bodies of revolution. The basic equations of motion are derived for the grinding bodies shaped at cylinders at contact with the material to be destroyed. The research used theory of machines and mechanisms, laws of theoretical mechanics, mathematical modeling and computation experiment. The framework is developed for the mathematical model for determining design and process variables of centrifugal milling machines with differentially moving grinding bodies as bodies of revolution. The kinematic diagram of interaction between the mill components and solid particles in the process of fine and ultra-fine milling is developed with regard to estimated duty parameters of the milling machine. The optimized control algorithm for ultra-fine dispersion in milling machines with differentially moving grinding bodies is implemented. Based on the integrated system of equations, an algorithm is composed to produce calculation formulas for centrifugal milling machine design and ultra-fine milling control for engineering materials having different physical and mechanical properties. The obtained mathematical modeling results seem to be of use in design of novel centrifugal milling machines and their duty optimization later on.

Key words: centrifugal mills, grinding bodies, mathematical modeling, ultra-fine milling, overgrinding, ultra-disperse systems.

For citation: Frolov S. G., Usov G. A., Antropov L. A. Generation of destructive loads in centrifugal-type milling machines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(11-1):179–189. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_179.

Введение

Современная тенденция исследований свойств тонкоизмельченных материалов изучает эффекты, возникающие в процессе механоактивации через воздействие механическими нагрузками, не приводящими к разрушению частиц обрабатываемого материала. И, соответственно, обозначенные исследования нуждаются в разработке новой измельчительной техники с повышенной динамикой самого процесса измельчения и сопутствующей механоактивации [1].

Эффективность сверхтонкого измельчения и механоактивации, в отличие от тихоходных мельниц, при создании измельчительной машины «МИ-Э» будет обеспечена следующими отличительными аспектами:

– за счет повышенной динамики работы мелющих тел будет обеспечена энергонапряженность самого процесса измельчения;

– на два порядка будет увеличено количество единовременно происходящих актов разрушения;

– на измельчаемый материал будут воздействовать повышенные сжимающие нагрузки за счет увеличения центробежных сил, возникающих при обращении и перекатывании мелющих тел по внутренней части цилиндрического корпуса;

– за счет увеличения частоты вращения мелющих тел вокруг своей оси будет создаваться «истирающее-раздавливающий» режим измельчения, исключающий возникновение вторичной агрегатации уже измельченных частиц.

Целью проведения научно-исследовательских работ по обозначенному выше направлению является создание математической модели, позволяющей рассчитывать конструктивные параметры измельчительной машины «МИ-Э» и параметров самого процесса сверхтонкого измельчения и механоактивации различных технологических материалов. По окончании НИОКР будет создан промышленный образец измельчительной машины «МИ-Э», способной

в прямоточном режиме осуществлять сверхтонкое измельчение и механоактивацию технологических материалов в таких отраслях, как нефтегазодобывающая, обогащение полезных ископаемых, химическая, лесоперерабатывающая, производство различных композитных материалов, получение расходных порошков для аддетивных технологий — металлических, полимерных, минеральных вяжущих, древесно-полимерных и др.

Разрабатываемая измельчительная машина «МИ-Э» конструктивно отличается от последних разработок высокоэффективных измельчительных машин, используемых для производства тонких и сверхтонких порошков технологических материалов энергонасыщенных дисперсных систем. Предлагаемая конструкция «МИ-Э» позволяет обеспечивать большие скорости передачи разрушающей энергии от рабочих мелющих органов к измельчаемому материалу и производить его механоактивацию с повышенным КПД и минимальными потерями энергии на сопутствующие непроизводительные физико-химические процессы. В полном укомплектованном состоянии измельчительный комплекс на базе измельчительной машины «МИ-Э» обеспечен аспирационной системой, позволяющей выводить из технологического потока при прямоточном измельчении частицы заданного конечного размера, исключая их переизмельчение. На сегодняшний день воздушные классификаторы позволяют (в промышленных объемах) получать порошки очень узких классов от 0,1 мкм и крупнее, с разбежкой в несколько микрон.

Схема измельчительной машины «МИ-Э» изображена на рис. 1 в виде вертикального сечения. В компоновку измельчительной машины входят две независимые системы:

– система предварительной аспирационной классификации и дозированной подачи исходного материала;

– сама система измельчения и механоактивации технологических материалов.

Конструкция «МИ-Э» представляет собой каскадный центробежный измельчительный аппарат, состоящий из вертикального цилиндрического корпуса *1*, верхней крышки *2*, нижней опорной плиты *3*, внутренней футеровки *4* (из высокопрочной стали), центрального вала *5*, верхнего *6* и нижнего *7* подшипниковых блоков. Устройство дозированной подачи исходного материала и предварительной аспирационной классификации состоит из приемного патрубка *8*, аспирационного конфузора *9*, конического бункера *10*, центробежного дискового разбрасывателя *11*, потоконаправляющих лопаток *12*, внутренней стенки бункера *13* и разрыхляющих ребер *14*.

Ротор измельчительной машины скомпонован из трех секций, расположенных одна на другой на центральном валу *5*. Секции измельчительной машины сформированы из кольцеобразных дисков *15* и *16*, между которыми находятся фиксирующие патрубки *17*. В каждой секции смонтированы гнезда для измельчающих рабочих органов *18* путем фиксации в вертикальном положении толкающих пластин *19* по образующей ротора посредством стягивания секции шпильками *20*. Скомпонованные секции находятся между нижними *21* и верхними *22* моментопередающими дисками и соединены через штифты *23* и шпильки *24* с ведущими кольцевыми дисками. Крутящий момент с вала *5* на ротор передается через шпонки *25*, а с нижнего торца ротора установлены разбрасывающие ребра *27*. Конструкция измельчительной

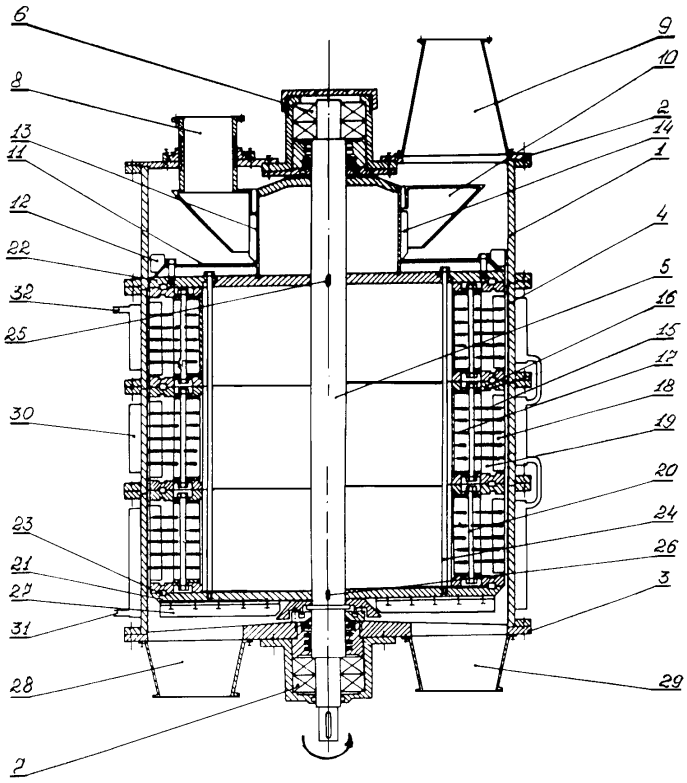

Рис. 1. Схема измельчительной машины «МИ-Э»
Fig. 1. Schematic diagram of the cascade mill of the centrifugal type of the design " MM-E"

машины «МИ-Э» также оснащена двумя выходными каналами *28* и *29* и системой наружного охлаждения *30* с входным *31* и выходным *32* патрубками для подачи технической воды.

Принцип действия разработанной измельчительной машины «МИ-Э» заключается в следующем.

Измельчительная машина «МИ-Э» является центробежным аппаратом непрерывного принципа действия. Исходный сыпучий материал под собственным весом перетекает в конический бункер *10* центробежного дискового разбрасывателя *11* из приемного патрубка *8*. В процессе вращения ротора измельчающие рабочие органы *18* в форме цилиндра под действием возникающих центробежных сил отбрасываются к футеровке *4* цилиндрического корпуса *1* и начинают перемещаться по ней, вращаясь вокруг своей оси и создавая сжимающе-сдвиговые нагрузки на попадающий под них исходный материал. Сыпучий материал, продвигаясь от верхнего приемного патрубка *8* к двум выходным каналам *28* и *29*, измельчается и насыщается внутренней и поверхностной энергией, т. е. механоактивируется. На выходе из каналов *28*, *29* измельченный материал подхватывается потоком аспирационной системы и подвергается классификации по среднему размеру частиц готового продукта. Степень механоактивации получаемого технологического

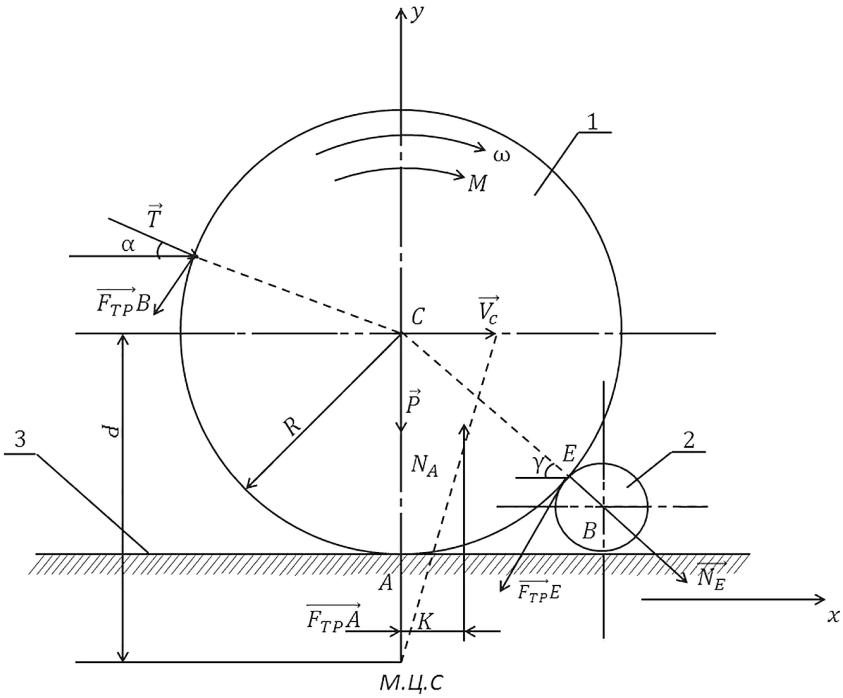

Рис. 2. Схема к расчету сил, действующих при работе мелющего тела в виде цилиндра
Fig. 2. Scheme for calculating the forces acting during the operation of the grinding body in the form of a ball

материала оценивается по изменению параметров его технологических свойств (например, после механоактивации — повышение прочностных свойств цементного камня, а значит и марки цемента) [2, 3].

Разрушающие нагрузки в центробежных измельчительных машинах возникают при контактировании вращающихся рабочих органов с футеровкой корпуса при попадании между ними частиц исходного продукта. На схеме (рис. 2) зафиксирован момент нагружения измельчаемой частицы *2* мелющим телом *1* цилиндрической формы, прокатывающимся по футерованной внутренней поверхности корпуса *3* каскадной мельницы центробежного типа. Мелющее тело перемещается по внутренней поверхности корпуса с угловой скоростью w_1 и совершает соответственно вращение вокруг своей оси с частотой вращения w. На цилиндрическое мелющее тело воздействует толкающая сила T, и частица *2* сдавливается в точке E нормальной силой N_E, а также в точке A под действием силы N_A. Для удобства расчетов данных сил участок /EA/ на схеме будем считать прямолинейным. В рабочем режиме центробежной мельницы динамика процесса измельчения и механоактивации в основном определяется возникающей силой N_E. Уравнения движения мелющего тела в рабочем режиме измельчения (рис. 2) могут быть записаны в следующем виде:

$$m\ddot{x}_c = T\cos\alpha - F_{\text{тр}B}\sin\alpha - F_{\text{тр}A} - N_E\cos\gamma - F_{\text{тр}E}\sin\gamma\,; \tag{1}$$

$$m\ddot{y}_c = N_A - P - T\sin\alpha - F_{\text{тр}B}\cos\alpha + N_E\sin\gamma - F_{\text{тр}E}\cos\gamma\,; \tag{2}$$

$$I_c\ddot{\phi} = F_{\text{тр}A} + M - F_{\text{тр}B}R + F_{\text{тр}E}R - N_A K\,, \tag{3}$$

где $F_{\text{тр}A} = f\,N_A$; $F_{\text{тр}B} = f\,T$; $F_{\text{тр}E} = f\,N_E$; $I_c = \dfrac{mR^2}{2}$; K — коэффициент трения качения, см; f — коэффициент трения скольжения; $\ddot{x}_c$, $\ddot{y}_c$ — ускорения центра массцилиндрического рабочего органа; $\ddot{\phi}$ — угловое ускорение цилиндрического рабочего органа.

Мгновенный центр скоростей цилиндрического рабочего органа в процессе помола не совпадает с точкой A, а смещен на величину d от центра масс цилиндрического рабочего органа C. В связи с этим $v_c = dw$ и $\dot{x}_c = d\dot{\phi}$, а $\ddot{x}_c = d\ddot{\phi}$. При этом $y_c = R$, т. е. $y_c = 0$. Соответственно, дифференциальные уравнения (1), (2) и (3) возможно записать в следующем виде [4—6]:

$$m\,d\,\ddot{\phi} = T\left(\cos\alpha - f\sin\alpha\right) - f\,N_A - f\,N_E\left(\cos\gamma + f\sin\gamma\right); \tag{4}$$

$$o = N_A - P - T\left(\sin\alpha + f\cos\alpha\right) - N_E\left(\sin\gamma - f\cos\gamma\right); \tag{5}$$

$$\frac{m\,R^2}{2}\ddot{\phi} = f\,N_A R + M - f\,T\,R + f\,N_E R - N_A K\,. \tag{6}$$

Нормальная сила реакции N_A на расстоянии K от точки касания A цилиндрического рабочего органа с футеровкой корпуса (рис. 2) может быть выражена из уравнения (5):

$$N_A = P + T\left(\sin\alpha + f\cos\alpha\right) - N_E\left(\sin\gamma - f\cos\gamma\right). \tag{7}$$

Сжимающая измельчаемую частицу сила N_E может быть выведена из уравнения (6).

$$\frac{m\,R}{2}\ddot{\phi} = N_A\left(f - \frac{K}{R}\right) + \frac{M}{R} - f\,T + f\,N_E\,. \tag{8}$$

Затем, проведя преобразования, путем подстановки уравнения (7) в выражения (4), (8) получим дифференциальные уравнения:

$$\begin{aligned} m\,d\,\ddot{\phi} = T\left(\cos\alpha - f\sin\alpha\right) - f\Big[P + T\left(\sin\alpha + f\cos\alpha\right) - \\ - N_E\left(\sin\gamma - f\cos\gamma\right)\Big] - N_E\left(\cos\gamma + f\sin\gamma\right); \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned} \frac{m\,R}{2}\ddot{\phi} = \left(f - \frac{K}{P}\right)\Big[P + T\left(\sin\alpha + f\cos\alpha\right) - \\ - N_E\left(\sin\gamma - f\cos\gamma\right)\Big] + \frac{M}{R} - f\,T + f\,N_E. \end{aligned} \tag{10}$$

Далее из уравнений (9) и (10) определяем силу N_E [7—9]:

$$m\,d\,\ddot{\phi} = T\left(\cos\alpha - 2f\sin\alpha - f^2\cos\alpha\right) - f\,P - N_E\left(\cos\gamma + f^2\cos\gamma\right). \tag{11}$$

Для дальнейших преобразований введем следующие обозначения:

$$\cos\alpha - 2f\sin\alpha - f^2\cos\alpha = a \;;\; \cos\gamma + f^2\cos\gamma = b\,. \tag{12}$$

Принятые обозначения (12) позволяют записать уравнение (9) в следующем виде:

$$m\,d\,\ddot{\phi} = a\,T - f\,P - b\,N_E\,, \tag{13}$$

и окончательно сила N_E запишется:

$$N_E = \frac{a\,T - f\,P - m\,d\,\ddot{\phi}}{b}\,. \tag{14}$$

После математических преобразований уравнение (10) возможно записать:

$$\frac{m\,R}{2}\ddot{\phi} = \frac{M}{R} + T\left[\left(f - \frac{K}{R}\right)\left(\sin\alpha + f\cos\alpha\right) - f\right] +$$
$$+\left(f - \frac{K}{R}\right)P - N_E\left[\left(f - \frac{K}{R}\right)\left(\sin\gamma - f\cos\gamma\right) - f\right]. \tag{15}$$

В выражение (15) для удобства расчетов введем обозначения:

$$(f - \frac{K}{R})\left(\sin\alpha - f\cos\alpha\right) - f = c\,;(f - \frac{K}{R})\left(\sin\gamma - f\cos\gamma\right) - f = e\,. \tag{16}$$

Соответственно, выражение (15) примет следующий вид:

$$\frac{m\,R}{2}\ddot{\phi} = \frac{M}{R} + c\,T + (f - \frac{K}{R})P - e\,N_E\,, \tag{17}$$

а выражение (14) может быть записано в следующем виде:

$$N_E = \frac{\frac{M}{R} + c\,T + (f - \frac{K}{R})P - \frac{m\,R}{2}\ddot{\phi}}{e}\,. \tag{18}$$

Уравнения (14) и (18) приравниваем относительно силы N_E и получаем дифференциальные уравнения:

$$\frac{a\,T - f\,P - m\,d\,\ddot{\phi}}{b} = \frac{\frac{M}{R} + c\,T + (f - \frac{K}{R})P - \frac{m\,R}{2}\ddot{\phi}}{e}\,; \tag{19}$$

$$\ddot{\phi}\,(\frac{m\,R^2}{2} - \frac{e}{b}m\,d) = \frac{M}{R} + T\,(c - \frac{e}{b}a) + P\,(f - \frac{K}{R} + \frac{e}{b}f)\,. \tag{20}$$

В режиме помола ротор мельницы вращается, и на цилиндрические рабочие органы действует центробежная сила P , определяемая из выражения [10, 11]:

$$P = m\,R_{\text{-р}}\omega_1^2 = \frac{m\,R^2}{R_{\text{-р}}}\omega^2 = \frac{m\,R^2}{R_{\text{-р}}}\dot{\phi}^{\;2}\,, \tag{21}$$

где $R_{-р}$ — радиус окружности движения центра масс цилиндрического рабочего органа, находящийся в точке C; ω_1 — окружная скорость вращения ротора измельчительной машины; ω — частота обращения самого цилиндрического рабочего органа вокруг своей оси $\omega = \omega_1 \frac{R_{-р}}{R}$.

Соответственно, толкающая цилиндрический рабочий орган сила T может быть рассчитана из выражения:

$$T = \frac{m K R}{f R_{-р}} \dot{\phi}^2. \tag{22}$$

Далее, произведя замену сил P и T их уравнениями (21), (22), возможно записать дифференциальное уравнение:

$$\ddot{\phi} = \frac{M}{R(\frac{m R}{2} - \frac{e}{b} m d)} + \dot{\phi}^2 \frac{\frac{mKR}{f R_{-р}}(- - \frac{e}{b} a) + \frac{mR^2}{R_{-р}}(f - \frac{K}{R} + \frac{e}{b} f)}{\frac{mR}{2} - \frac{e}{b} m d}. \tag{23}$$

Для упрощения расчетов в выражении (23) введем обозначения:

$$\frac{M}{R(\frac{mR}{2} - \frac{e}{b} m d)} = x \; ; \; \frac{\frac{mKR}{f R_{-р}}(c - \frac{e}{b} a) + \frac{mR^2}{R_{-р}}(f - \frac{K}{R} + \frac{e}{b} f)}{\frac{mR}{2} - \frac{e}{b} m d} = y. \tag{24}$$

Соответственно, выражение (23) упростится до следующего вида:

$$\ddot{\phi} = x + \dot{\phi}^2 y. \tag{25}$$

Полученное выражение (25) может быть записано в двух вариантах:

$$\frac{d\dot{\phi}}{dt} = x + y\dot{\phi}^2 \text{ или } \frac{d\dot{\phi}}{x + y\dot{\phi}^2} = dt, \tag{26}$$

а после решения получаем:

$$\frac{1}{\sqrt{xy}} arctg(\sqrt{\frac{y}{x}}\dot{\phi}) = t + c_1. \tag{27}$$

Далее выберем изначальные условия ($\dot{\phi} = 0$ при $t = 0$) и получим время разгона ротора мельницы до рабочей частоты вращения при помоле:

$$t = \frac{1}{\sqrt{xy}} arctg(\sqrt{\frac{y}{x}}\dot{\phi}) \; ; \sqrt{xy}\, t = arctg(\sqrt{\frac{y}{x}\dot{\phi}}) \; ; \dot{\phi} = \sqrt{\frac{x}{y}}\, tg(\sqrt{xy}\, t). \tag{28}$$

Введем ограничительные моменты до установления рабочего режима работы мельницы:

$$\sqrt{xy}\, t < 90. \tag{29}$$

Из выражения (29) следует, что время до установления рабочего режима помола составит $t_{\square р} = \frac{90}{\sqrt{xy}}$ или может быть записано диффренциальным уравнением:

$$\ddot{\phi} = \frac{d\dot{\phi}}{dt} = \sqrt{\frac{x}{y}} \frac{\sqrt{xy}}{\cos^2(\sqrt{xy}\, t)} = \frac{x}{\cos^2(\sqrt{xy}\, t)}. \quad (30)$$

При заданном промежутке времени вхождения центробежной мельницы в рабочий режим помола по выражениям (31), (32) могут быть вычислены силы $N_E = f\left(\dot{\phi}, \ddot{\phi}\right)$ и $N_A = f\left(\dot{\phi}, \ddot{\phi}\right)$ [12]:

$$N_E = \frac{\frac{M}{R} c T + (f - \frac{K}{R}) P - \frac{m R}{2} \ddot{\phi}}{e}; \quad (31)$$

$$N_A = P + T\left(\sin\alpha + f\cos\alpha\right) - N_E\left(\sin\gamma - f\cos\gamma\right), \quad (32)$$

где M — момент, создаваемый силойтрения $F_{трВ}$; P, T — силы, вычисляемые из выражений (21), (22); C, e — коэффициенты, рассчитываемые по уравнению (16).

Итак, зная величину $t_{\square р}$ и определив для него значения $\dot{\varphi}$ и $\ddot{\varphi}$, можно рассчитать максимальное значение сил N_E и N_A для данной измельчительной машины при установившемся режиме работы и оценить эффективность ее работы при тонком и сверхтонком измельчении твердых материалов с различными физико-механическими свойствами.

Выводы

Разработанная математическая модель процесса сверхтонкого измельчения и механоактивации сыпучих твердых материалов с различными физико-механическими свойствами в измельчительных машинах центробежного типа позволит рассчитывать конструктивные и технико-технологические параметры новых конструкций измельчительных устройств данного типа. Полученный обобщенный математический алгоритм позволит на стадии конструирования опытных образцов определять оптимальные режимы сверхтонкого измельчения различных твердых материалов в измельчительных аппаратах центробежного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ходаков Г. С.* Физика измельчения. — М.: Наука, 1972. — 308с.
2. Патент РФ № 2110326, 26.04.1996. Калашников В. Н., Усов Г. А., Федоров М. В. Центробежная мельница. 10.05.1998. Бюл. № 5.
3. Патент РФ № 2164815, 22.08.2000. Калашников В. Н., Усов Г. А. Способ измельчения твердых материалов и измельчающее устройство для его осуществления. 10.04.2001. Бюл. № 10.
4. *Argimbaev K. R.*, *Maya B. O.* The experience of the introduction of mobile crushing and screening complexes on a deposit of building materials // Research Journal of Applied Sciences, 2016, Vol. 11, no 6, pp. 300—303.
5. *Oparin V. N.*, *Timonin V. V.*, *Karpov V. N.*, *Smolyanitsky B. N.* Energy-based volumetric rock destruction criterion in the rotary–percussion drilling technology improvement // Journal of Mining Science. 2017. Vol. 53. No 6. Pp. 1043—1064. DOI: 10.1134/S1062739117063114.

6. *Morrell S.* Modelling the influence on power draw of the slurry phase in Autogenous (AG), Semi-autogenous (SAG) and ball mills // Minerals Engeneering. 2016. Vol. 89. pp. 148—156.

7. *Fonte M., Reis L., Romeiro F., Li B., Freitas M.* The effect of steady torsion on fatigue crack growth in shafts// International Journal of Fatigue, 28. — 2016. — pp. 609—617.

8. *Хомунов Э. А.* Анализ причин низкой энергоэффективности процессов разрушения минерального сырья // Современная техника и технологии. — 2014. — № 10.

9. *Шишкин А. А.* Исследование влияния силы трения на движение элементов загрузки мельниц рудного самоизмельчения // Вестник ИрГТУ. — 2012. — № 9 (68). — С. 211— 213.

10. *Грабский А. А.*, *Покаместов А. В.* Научные основы нового гироскопического принципа создания усилий разрушения в горных машинах и устройствах для разрушения горных пород истиранием // Современные проблемы науки и образования. — 2012. — № 6.

11. *Котляров А. А.* Теоретическая механика и сопротивление материалов / А. А. Котляров. — РнД: Феникс, 2014. — 318 с.

12. *Козловский М. З.* Теория механизмов и машин / М. З. Козловский, А. Н. Евграфов и др. — М.: Academia, 2015. — 192 с. ГИАБ

REFERENCES

1. Khodakov G.S. *Fizika izmel'cheniya* [Physics of grinding]. Moscow, Nauka, 1972. 308 p. [In Russ]

2. *Patent RU 2110326*, 26.04.1996. Kalashnikov V. N., Usov G. A., Fyodorov M. V. Centrifugal mill. 10.05.1998. Bulletin no. 5. [In Russ]

3. *Patent RU 2164815*, 22.08.2000. KalashnikovV. N., Usov G.A. A method for grinding solid materials and a grinding device for its implementation. 10.04.2001. Bulletin No. 10. [In Russ]

4. Argimbaev K. R., Maya B. O. The experience of the introduction of mobile crushing and screening complexes on a deposit of building materials. Research Journal of Applied Sciences, 2016, Vol. 11, no. 6, pp. 300—303.

5. Oparin V. N., Timonin V. V., Karpov V. N., Smolyanitsky B. N. Energy-based volumetric rock destruction criterion in the rotary–percussion drilling technology improvement. Journal of Mining Science. 2017. Vol. 53. no. 6. Pp. 1043-1064. DOI: 10.1134/S1062739117063114.

6. Morrell S. Modelling the influence on power draw of the slurry phase in Autogenous (AG), Semi-autogenous (SAG) and ball mills. Minerals Engeneering. 2016. Vol. 89. pp. 148—156.

7. Fonte. M., Reis. L., Romeiro. F., Li, B., Freitas. M. The effect of steady torsion on fatigue crack growth in shafts. International Journal of Fatigue, 28. 2016. pp. 609—617.

8. Khomutov E. A. Analysis of the causes of low energy efficiency of the processes of destruction of mineral raw materials. *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii*. 2014. no. 10. [In Russ]

9. Shishkin A.A. Investigation of the effect of friction force on the movement of loading elements of ore self-grinding mills. *Vestnik IrGTU*. 2012, no. 9 (68). pp. 211—213. [In Russ]

10. Grabsky A. A., Pokamestov A.V. Scientific foundations of a new gyroscopic principle of creating destruction forces in mining machines and devices for the destruction of rocks by abrasion. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2012, no. 6. [In Russ]

11. Kotlyarov A.A. *Teoreticheskaya mechanika i soprotivlenie materialov* [Theoretical mechanics and resistance of materials]. Rostov naDonu, Feniks, 2014, 318 p. [In Russ]

12. KozlovskiyM. Z. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [The theory of mechanisms and machines]. Moscow, Academia, 2015, 192 p. [In Russ]

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фролов Сергей Георгиевич[1] — канд. техн. наук, доцент, проректор;
Усов Гаврил Анатольевич[1] — канд. техн. наук, доцент, доцент;
Антропов Леонид Александрович[1] — канд. техн. наук, доцент, доцент;
[1] Уральский государственный горный университет, 620144, ул. Куйбышева, 30, Екатеринбург, Россия.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Frolov S. G.[1], Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Pro-Rector;
Usov G. A.[1], Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor
Antropov L. A.[1], Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor
[1] Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia.

Получена редакцией 25.05.2021; получена после рецензии 21.09.2021; принята к печати 10.10.2021.
Received by the editors 25.05.2021; received after the review 21.09.2021; accepted for printing 10.10.2021.