= МЕХАНИКА МАШИН ==

УДК 622.23.05

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОРОДЫ С ВИБРАЦИОННОЙ ЩЕКОВОЙ ДРОБИЛКОЙ

© 2021 г. Г. М. Альтшуль<sup>1,\*</sup>, А. М. Гуськов<sup>1</sup>, Г. Я. Пановко<sup>1,\*\*</sup>

<sup>1</sup> Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия \*e-mail: grigoryaltshyl@gmail.com \*\*e-mail: gpanovko@yandex.ru

> Поступила в редакцию 13.08.2020 г. Принята к публикации 22.10.2020 г.

В статье рассматриваются вопросы моделирования взаимодействия щеки вибрационной щековой дробилки с обрабатываемой породой, представляющей собой кусковой материал. Для описания движения породы и ее последовательного разрушения на более мелкие фрагменты камера дробления разделена на равные по высоте зоны. В каждой текущей зоне после определенного числа циклов нагружения обрабатываемый материал разрушается на более мелкие фракции и перемещается в следующую зону, где происходит их последующее дробление. Дробимый материал, находящийся в текущей зоне, описывается феноменологической моделью, учитывающей упруговязкие свойства и отражающей процесс последовательного разрушения обрабатываемого материала при многократном сдавливании. Получены дифференциальные уравнения движения щеки, учитывающие послойное взаимодействие с обрабатываемой породой. Проанализированы амплитуды колебаний щеки во времени, а также распределение усилий по длине щеки.

*Ключевые слова*: дробление, вибрационная щековая дробилка, реология, феноменологическая модель

DOI: 10.31857/S0235711921010053

Для дробления полезных ископаемых и твердых промышленных отходов широкое распространение получили двухщековые вибрационные щековые дробилки. Дробление материала происходит в рабочей камере дробилки, образованной корпусом и двумя колеблющимися щеками. Одна из возможных принципиальных схем вибрационной двухщековой дробилки представлена на рис. 1 [1].

Корпус дробилки 1 установлен на упругом подвесе 3. Каждая из щек 4 закреплена на торсионе 2, что обеспечивает их подвижность в угловом направлении. Колебательное движение щек создается дебалансными вибровозбудителями 5, закрепленными непосредственно на каждой из щек. Вертикальными стрелками показано направление загрузки и разгрузки обрабатываемой породы, а дуговыми — направление вращения дебалансов. Дробление материала происходит при синхронном противофазном движении щек, которое обеспечивается за счет самосинхронизации вращения дебалансов. При этом щеки могут двигаться с одинаковыми, кратными или находящимися в рациональных отношениях частотами. Вибрационные щековые дробилки считаются одним из прогрессивных типов дробилок, так как они не требуют использования сложной и мало надежной конструкции при использовании жестких кинематических связей в приводе щек. Одним из важнейших достоинств вибрационных щековых дро-



Рис. 1. Принципиальная схема двухщековой вибрационной дробилки.

билок является возможность пропускать недробимые фракции, что снижает нагрузки на элементы дробилки и риск их разрушения [1].

Вместе с тем на практике иногда наблюдается рассогласование движения щек, что влечет ухудшение качества дробления и необходимость повторного дробления.

Цель и постановка задачи исследования. Основная цель настоящего исследования заключается в создании математической модели материала, обрабатываемого в вибрационной щековой дробилке, что позволяет прогнозировать влияние свойств этого материала на амплитуды колебаний щеки и распределение усилий по ее длине.

Создание такой модели должно основываться на адекватном описании процесса взаимодействия щек с обрабатываемым материалом при учете его физико-механических свойств, описываемых реологическими моделями механики [2–4].

Существующие подходы к моделированию процесса дробления. Исследованию процесса дробления материала посвящена обширная литература [4–13]. При небольших деформациях, напряжения, возникающие в частях куска, контактирующих со щекой, в состоянии разрушить лишь имеющиеся на нем выступы. Однако по мере обкалывания и приобретения куском окатанной формы возрастает поверхность контактных зон.

Физико-механические свойства породы зависят от самых различных факторов: водонасыщенности, пористости, трещиноватости, минеральной и объемной плотности, содержания вредных компонентов и примесей, взаимного расположения отдельных кусков породы в камере дробления, пределов прочности на сжатие в сухом или водонасыщенном состоянии и т.п. [5]. В частности, в работах [6–9] влияние свойств материала на динамику щековой дробилки учитывается введением эквивалентного коэффициента рассеивания энергии.

В статье [9] выводится дифференциальное соотношение, позволяющее связать моменты начал интервалов свободного падения и разрушения материала на данном уровне рабочей полости щековой дробилки. Получены формулы для определения закона изменения объемной концентрации материала по высоте рабочей полости и общего времени движения материала при периодической вибрации щек.

В работе [10] кусок горной породы, находящийся в камере дробления щековой дробилки, представляется в виде твердого тела, находящегося под действием трех сил.

В работе [11] предложен подход, основанный на феноменологической модели гистерезиса внутреннего трения при нестационарных колебаниях, идентификация параметров которой, проводится с использованием экспериментальных данных для стационарных колебаний системы.

Стохастический подход, основанный на спланированном эксперименте, рассмотрен в работе [12]. Параметры аппроксимации эмпирического распределения соотносятся со свойствами материала и технологическими характеристиками дробящей машины. В работе [13] изучено влияние трения между породой и щекой дробилки на основе экспериментального и теоретического распределения давления по длине щеки, как функции времени и положения щеки. Показано, что по мере сужения дробильной камеры давление на щеку возрастает.

Феноменологическое описание горной массы в виде трехмассового инерционного упроговязкопластического тела для описания процесса вибрационного дробления щековыми дробилками предложено в [4]. В рамках дискретных представлений принято, что общая масса горной породы сосредоточена в трех элементах. Упругие свойства породы воспроизводятся упругими элементами модели. Рассеяние энергии (гистерезисные потери) в области упругих деформаций модели реализуются линейно-вязкими демпферами. Пластические деформации с упрочнением моделируются клиновыми элементами сухого трения. Кроме того, учитывается трение породы о дробящие щеки. Существенным недостатком предложенной модели является необходимость идентификации большого числа параметров, что вызывает определенные трудности в связи с неоднозначностью получаемых результатов.

Несмотря на достаточно большое число публикаций, посвященных моделированию физико-механических свойств породы, их влияние на движение щек в вибрационной двухщековой дробилке изучено недостаточно подробно.

**Модель щеки.** В силу симметричного характера взаимодействия обрабатываемого материала со щеками вибрационной дробилки при их синхронном противофазном движении при формировании расчетной модели, описывающей колебания щек, примем, что одна из щек жестко закреплена в плоскости симметрии камеры дробления (рис. 2). Другая колеблющаяся щека в точке O закреплена на торсионном валу. Щека моделируется абсолютно твердым телом, обладающим массой  $m_0$  и моментом инерции  $J_C$  относительно своего центра масс (точка C). Центр массы плиты расположен на расстоянии  $l_C$  от точки закрепления. Длина поверхности плиты l, а ее рабочая часть, непосредственно взаимодействующая с обрабатываемой породой, начинается на расстоянии  $l_a$  вдоль поверхности щеки от точки подвеса. Торсионный вал обладает линейной характеристикой крутильной жесткости с коэффициентом k и линейной диссипацией с коэффициентом d.

Для возбуждения угловых колебаний на щеке в точке B, расположенной на расстоянии  $l_b$  под углом  $\beta$  к рабочей поверхности щеки, установлен центробежный возбудитель с дебалансом массой  $m_d$  и эксцентриситетом e, вращающийся с угловой скоростью  $\omega$ .

В положении статического равновесия центр масс щеки находится на линии, проходящей через точку подвеса щеки под углом  $\varphi_{st}$  к вертикальной оси *Oy* неподвижной системы координат *xOy* (начало системы координат *xOy* совпадает с осью торсиона).

Угол поворота рабочей поверхности щеки  $\varphi$  отсчитывается от положительного направления оси *Oy* по ходу часовой стрелки. Угол поворота дебаланса относительно щеки  $\gamma$  отсчитывается от вертикали против хода часовой стрелки. Возможные поступательные перемещения точки закрепления щеки *O* в данной работе не рассматриваются.

При моделировании движения щеки будем учитывать силу тяжести щеки с вибровозбудителем, упругие и диссипативные реакции торсиона, реакцию обрабатываемой породы. Влияние характеристики электродвигателя, вращающего дебаланс, не рассматривается.



Рис. 2. Схема щеки вибрационной щековой дробилки.



**Рис. 3.** Схема разбиения камеры дробления и послойного распределения модели дробимого материала (а) и реологическая модель *E<sub>i</sub>* феноменологического элемента (б).

Предполагается, что колебания щеки происходят в зарезонансной области, что обеспечивается соответствующим выбором скорости вращения дебаланса вибровозбудителя и жесткостью торсиона.

Модель породы и ее взаимодействие со щекой. Для моделирования процесса взаимодействия кускового материала со щекой рабочая область дробильной камеры разбивается на равные по высоте зоны (рис. 3а). Обрабатываемая порода представляется набором дискретных элементов  $E_i$ , состоящих из однотипных масштабно-подобных реологических моделей слоя кускового материала, которые распределяются по зонам в зависимости от крупности моделируемых кусков слоя. При этом, в каждой *j*-й зоне единовременно может находиться не более одного элемента. Такой элемент выдерживает определенное количество взаимодействий со щекой, по достижении которого происходит его дробление и элемент опускается вниз по камере дробления. Это число взаимодействий определяется накоплением повреждений в куске породы и его ориентацией при сдавливании. По данным [4] раскалывание куска происходит примерно через 10–15 взаимодействий со щекой. В настоящей работе принято, что переход слоя в следующую зону камеры дробления происходит после 10 периодов колебаний щеки.

В самую верхнюю зону элемент добавляется с заранее выбранным периодом. Этот период связан с интенсивностью подачи материала — производительностью дробил-

ки. Изменяя количество зон и частоту создания новых элементов можно моделировать дробление породы разной крупности. Распределение сил вдоль щеки определяется в зависимости от параметров всех элементов в рабочей зоне в процессе дробления.

Реологическая модель *i*-го элемента представлена на рис. 36, где штриховой линией изображено состояние элемента при сжатии. Элемент состоит из трех составляющих: пружины жесткостью  $k_{e(i)}$ , демпфера сухого трения, обладающего предельной силой  $F_{\text{lim}(i)}$ , которая определяется пределом прочности материала на сжатие, и линейновязкого демпфера с коэффициентом демпфирования  $d_{e(i)}$ . Каждый такой элемент позволяет учесть обкалывание куска и его последовательное разделение на более мелкие фракции и уплотнение породы по мере ее продвижения по камере дробления [13]. При этом величина предельной силы  $F_{\text{lim}(i)}$  увеличивается на  $\Delta F_{(i)}$ , что связано с проявлением масштабного эффекта при разрушении: в менее крупных кусках присутствует меньшее количество неоднородностей, влияющих на прочность материала [5]. Элемент совершает работу только при сжатии материала.

Рассмотрим поведение части элемента, состоящей из последовательно соединенной пружины и демпфера сухого трения при сжатии силой  $F_{*(i)}$ . Относительное перемещение  $U_{(i)}$  точек A и B при сжатии (перемещения точки касания *i*-го элемента с колеблющейся щекой относительно неподвижной стенки камеры дробления)

$$U = \begin{cases} F_{*}/k_{e}, & F_{*} < F_{\lim}, \\ \infty, & F_{*} = F_{\lim}. \end{cases}$$

Здесь и ниже для упрощения записи опущен индекс (*i*), характеризующий параметры *i*-го элемента.

Зависимость сжимающей силы F\* от перемещения U запишем в виде

$$F_{*} = \begin{cases} k_{e}U, & U < \frac{F_{\lim}}{k_{e}}, \\ F_{\lim(i)}, & U \ge \frac{F_{\lim}}{k_{e}}, \end{cases}$$
(1)

где последнее равенство в (1) соответствует дроблению *i*-го элемента, находящегося в j-й зоне.

Для последующего численного интегрирования кусочно-линейную функцию (1) целесообразно заменить гладкой функцией. В качестве аппроксимации кусочно-линейной функции (1) будем использовать гладкую функцию от гиперболического тангенса в виде

$$F_*(s,U) = \frac{F_{\text{lim}}}{2} \left[ 1 + \tanh \frac{s\left(U - F_{\text{lim}}/k_e\right)}{L_e} \right] H\left(\dot{U}\right),\tag{2}$$

где s – коэффициент, учитывающий приближение гладкой функции к силовой характеристике (2), который определяется из минимума среднеквадратического отклонения. Функция Хевисайда  $H(\dot{U})$  позволяет отразить работу элемента только при сжимающем воздействии щеки.

С учетом (2) и линейно-вязкого демпфера итоговое выражение для реакции, возникающей при сжатии *i*-го элемента феноменологической модели слоя, приобретает вид

$$F(s,U) = \left\{ \frac{F_{\text{lim}}}{2} \left[ 1 + \tanh \frac{s\left(U - \frac{F_{\text{lim}}}{k_e}\right)}{L_e} \right] + d_e \dot{U} \right\} H(\dot{U}).$$
(3)

Параметры элементов, определяющие физико-механические свойства обрабатываемого материала, получаются усреднением свойств реальной дробимой породы.

Дифференциальные уравнения движения щеки. Дифференциальное уравнения движения щеки с учетом ее взаимодействия с обрабатываемым материалом составим, используя уравнение Лагранжа 2-го рода

$$\left(\frac{m_0 l^2}{4} + m_d l_b^2 + J_C\right) \ddot{\varphi} + d\dot{\varphi} + k\varphi = -2m_d l_b^2 \cos\left(\varphi + \omega t - \beta\right) \ddot{\varphi} + + m_d l_b^2 \sin\left(\varphi + \omega t - \beta\right) \left[2\left(\dot{\varphi} + \omega\right)\dot{\varphi} - \dot{\varphi}^2 - \left(\dot{\varphi} + \omega\right)^2\right] - m_0 l_g \sin\left(\varphi\right) - - m_d l_d g \sin\left(\varphi - \beta\right) + \sum_{i=1}^N \left\{F_i\left(s, U_i\right) l_{f(i)}\right\} \cos\left(\varphi\right),$$

где i – индекс i-го элемента;  $l_{f(i)}$  – расстояние от точки крепления щеки до точки касания с i-м элементом; N – количество элементов в камере дробления.

Для перехода к безразмерной форме введем масштаб времени  $t_* = \sqrt{J_{\Sigma}/k}$ , где  $J_{\Sigma} = m_0 l^2/4 + m_d l_b^2 + J_C$  – суммарный момент инерции щеки с дебалансом относительно оси, проходящей через центр тяжести щеки.

После приведения к нормальной форме Коши получим

$$\mathbf{x} = \begin{cases} x_1 \\ x_2 \end{cases} = \begin{cases} \phi \\ \dot{\phi} \end{cases}, \\ \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{G}(\mathbf{x}, \tau), \end{cases}$$

где

$$\begin{cases} G_1 = x_2, \\ G_2 = \{-2\zeta x_2 - x_1 + a_1 \sin(x_1 + \tilde{\omega}\tau - \beta) [2(x_2 + \tilde{\omega})x_2 - x_2^2 - (x_2 + \tilde{\omega})^2] - \\ -a_2 \sin(x_1) - a_3 \sin(x_1 - \beta) + Q(x_1, x_2, \tau) \cos(x_1) \} / (1 + 2a_1 \cos(x_1 + \tilde{\omega}\tau - \beta)). \end{cases}$$

Безразмерная суммарная динамическая реакция породы

$$Q = \sum_{i=1}^{N} \left\{ \left( F_*(s, x_1) l_{f(i)} / k + 2\zeta_{e(i)} \cos(x_1) x_2 \right) l_{f(i)} H(x_2) \right\}$$

Здесь использованы безразмерные параметры:  $\tau = t/t_*$  — безразмерное время;  $\zeta = d/(2\sqrt{J_{\Sigma}k})$  — безразмерный коэффициент диссипации торсиона;  $\zeta_{e(i)} = d_{e(i)}/(2\sqrt{J_{\Sigma}k})$  — безразмерный коэффициент диссипации *i*-го элемента;  $\tilde{\omega} = \omega t_*$  — безразмерная угловая скорость вращения дебаланса;  $a_1 = m_d l_b^2/J_{\Sigma}$ ,  $a_2 = m_0 lg/k$ ,  $a_3 = m_d l_d g/k$  — безразмерные коэффициенты.

**Численный расчет и анализ результатов.** Решение полученного дифференциального уравнения было проведено в программном комплексе Matlab с использованием итерационного метода Рунге–Кутты 4–5 порядка точности с переменным шагом (ode45, AbsTol=1e-12, RelTol=1e-6).

При численных расчетах были приняты значения параметров, соответствующие шековой дробилке типа ВЩД 600 × 800 [1]:  $m_0 = 2737$  кг;  $J_C = 80$  кг м<sup>2</sup>; l = 1,0 м;  $l_C = 0.8$  м;  $l_a = 0.4$  м;  $l_B = 1.01$  м; h = 1.55 м;  $l_0 = 0.5$  м;  $\beta = 0.47$  рад;  $\varphi_{st} = 0.26$  рад;  $m_d = 688$  кг; e = 0.1 м;  $\omega = 125$  рад/с; k = 32076 кН м (величина коэффициента диссипации торсиона составляет 5% от критического значения).

Для моделирования разрушения каждый элемент содержит счетчик циклов сжатия. При превышении определенного числа сжатий, элемент перемещается в следующую зону.



Рис. 4. График угловых колебаний щеки.

Варьируя средние значения свойств элементов, возможно рассмотрение влияния различной по свойствам обрабатываемой породы. Для численного расчета были выбраны следующие параметры элементов:  $k_e = 45 \text{ кH/m}$ ;  $d_e = 57 \text{ кH c/m}$ ;  $F_{\text{lim}} = 3 \text{ кH}$ ;  $\Delta F = 330 \text{ H}$ . Период добавления элементов выбран таким, чтобы в каждый момент времени в камере дробления находилось примерно 5–6 элементов.

На рис. 4 представлены графики угловых колебаний щеки во времени.

Колебания щеки происходят относительно положения статического равновесия  $\phi_{st}$ . Процесс колебаний щеки сопровождается биениями амплитуды. Эти биения связаны с фазой дробления материала: большим амплитудам колебаний соответствует начало этапа дробления при попадании материала в текущую зону. После нескольких циклов сжатия материал разрушается на меньшие фракции и амплитуды уменьшаются. Материал перемещается на один уровень вниз и цикл повторяется. Нерегулярный характер огибающей амплитуд связан с нелинейным характером реакции элемента (3).

Вертикальными линиями на рис. 4 отмечены два момента времени  $t_1 = 9.15$  с и  $t_2 = 9.68$  с, соответствующие моментам начала и конца одного из биений амплитуды. Для этих двух моментов времени на рис. 5 приведены распределения нагрузок по щеке, возникающих при взаимодействии со всеми элементами, находящимися в камере дробления.

Наблюдаемая нелинейность распределения усилий по длине щеки связана со сложным характером функции (3), описывающей силу взаимодействия каждого элемента со щекой. Из сравнения положений элементов в камере дробления в моменты времени  $t_1 = 9.15$  с и  $t_2 = 9.68$  с видно, что за один период биения все элементы опустились на несколько зон вниз. При этом величина реакции каждого элемента в момент времени  $t_2$  больше, чем в момент времени  $t_1$ . Это происходит из-за уплотнения обрабатываемого материала по мере перемещения к нижней части камеры дробления. Из-за этого, для второго момента времени, соответствующего наименьшей амплитуде (за данный период биения), нагрузка на щеку выше. В момент времени  $t_2$ ,



**Рис. 5.** Эпюры распределения нагрузки по щеке для моментов времени  $t_1 = 9.15$  с (a) и  $t_2 = 9.68$  с (б).



Рис. 6. График колебаний суммарного момента сопротивления породы, действующего на щеку.

происходит разрушение нижнего элемента, который дает наибольший вклад в момент сопротивления на щеку за счет наибольшего плеча и наибольшей плотности породы в конце камеры дробления. После этого разрушения момент сопротивления резко уменьшается, амплитуда колебаний увеличивается, затем цикл биений повторяется снова. Это объясняет наличие соответствующего характера биений, представленного на рис. 4.

Подобный характер нагрузки также отражает график изменения суммарного момента сопротивления породы, действующего на щеку (рис. 6). Характер изменения момента, действующего на щеку со стороны породы, аналогичен характеру колебаний щеки, которые также сопровождаются биениями. При этом, моменту времени начала цикла биения амплитуды  $t_1$  соответствует наименьший момент сопротивления породы, а моменту времени  $t_2$  (конец цикла биения амплитуды) — наибольший момент сопротивления. Этот факт также подтверждает предположение, что биения амплитуды вызваны изменением во времени технологической нагрузки от дробимого материала.

Заключение. В статье предложена феноменологическая модель взаимодействия дробимой породы со щекой вибрационной щековой дробилки, которая учитывает реологические свойства материала и их изменение в процессе дробления и перемещения по камере дробления. Результаты расчета коррелируют с существующими представлениями о процессе дробления в вибрационных щековых дробилках и имеющимися экспериментальными данными. Разработанная модель взаимодействия щеки дробилки с обрабатываемым материалом позволяет оценить распределение нагрузки по щеке, величину и частоту биений амплитуды колебаний этой нагрузки во времени, а также изменение ее величины в зависимости от механических свойств материала.

Полученные результаты можно использовать для прогнозирования возможных режимов самосинхронизации движения щек в вибрационных щековых дробилках и разработки соответствующих систем для их управления.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-19-00708).

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Вайсберг Л.А., Зарогатский Л.П., Туркин В.Я. Вибрационные дробилки. Основы расчета, проектирования и технологического применения. СПб.: ВСЕГЕИ, 2004. 306 с.
- 2. Муравлев А.В., Девятов А.С. Развитие теории упругопластических процессов А.А. Ильюшина и экспериментально-теоретических методов исследования вязкопластических свойств материалов при конечных деформациях // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2016. № 1. С. 84.
- 3. Бондарь В.С., Даншин В.В., Семенов П.В. Простейший вариант аппроксимации функционалов пластичности теории упругопластических процессов // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2012. № 3. С. 82.
- 4. Гончаревич И.Ф., Фролов К.В. Теория вибрационной техники и технологии М.: Изд-во "Наука", 1981. 319 с.
- 5. Вайсберг Л.А., Каменев Е.Е. Взаимосвязь структурных особенностей и физико-механических свойств горных пород // Горный журнал. 2017. № 9. С. 53.
- 6. *Нагаев Р.Ф., Туркин В.Я., Шишкин Е.В.* Динамика вибрационной щековой дробилки с нежестким креплением вибровозбудителей // Обогащение руд. 2002. № 3. С. 39.
- 7. Шишкин Е.В., Пугина О.А., Казаков С.В. Безударные колебания вибрационной щековой дробилки с наклонной камерой дробления // Фундаментальные основы механики. 2016. № 1. С. 55.
- 8. Шишкин Е.В., Сафронов А.Н. Динамика вибрационной щековой дробилки с учетом влияния технологической нагрузки // Обогащение руд. 2016. № 6. С. 39.
- 9. Архипов М.Н., Ветюков М.М., Нагаев Р.Ф., Утимишев М.М. Динамика вибрационной щековой дробилки с учетом влияния технологической нагрузки // Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2006. № 1. С. 21.

- 10. *Нагаев Р.Ф., Карагулов Р.Р.* Динамика вибрационной машины с учетом обрабатываемого материала // Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2001. № 1. С. 48.
- 11. Макаров А.В. Исследование процесса разрушения горных породы щековыми дробильными машинами и разработки методов соврешенствования их конструкции: автореф. дис ... канд. техн. наук (01.02.06)/ Макаров Алексей Владимирович; СибГИГУ. Томск, 2004. 21 с.
- 12. Данилин А.Н., Кузнецова Е.Л., Рабинский Л.Н. Модель гистерезиса энергорассеяния при колебаниях механических систем // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. 2014. № 4. С. 45.
- 13. *Нагаев Р.Ф., Утимишев М.М.* О движении материала в рабочей полости ВЩД // Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2002. № 1. С. 85.
- Tumidiajski T., Gawenda T., Saramak D., Naziemiec Z. Stohastic modeling and control of communition processes in jaw crushers // IMPC 2006 – Proceedings of 23rd International Mineral Processing Congress.
- 15. Lindqvist M., Evertsson C.M. Linear wear in jaw crushers // Minerals Engineering. 2003. № 16. C. 1.