

УДК 666.942

В.Ю. Мурог, аспирант; А.А. Гарабажиу, ассистент

**МЕТОДИКИ РАСЧЕТА КРИТИЧЕСКИХ СКОРОСТЕЙ РАЗРУШЕНИЯ ЧАСТИЦ МАТЕРИАЛА В МЕЛЬНИЦАХ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ**

In the article the state-of-the-art review of the main techniques of calculation of critical speed of destruction of particles of a material in mills of percussion action is conducted. The new technique of calculation on the basis of the size of particles is offered.

В настоящее время основной проблемой при проектировании мельниц ударного действия является вопрос определения оптимальных параметров и скорости движения рабочих органов.

Процессы измельчения являются весьма распространенными и встречаются практически в любой отрасли производственной деятельности. Применение тонко- и сверхтонко измельченных материалов повышает эффективность технологических процессов, приближает их к научно обоснованной оптимальной технологии.

Ежегодно на измельчение затрачивается около 5–10% от всей производимой в мире электроэнергии и несколько миллионов тонн высококачественной стали. Практика показывает, что удельный расход электроэнергии резко возрастает с увеличением тонины помола, тогда как используемые в настоящее время для измельчения машины, особенно для сверхтонкого помола, отличаются чрезвычайно низкой эффективностью, и КПД их составляет в лучшем случае несколько процентов.

Поэтому основная задача, поставленная перед современной теорией измельчения, заключается в выявлении и устранении причин чрезвычайно низкой эффективности работы измельчающих машин.

Эффективность помола какого-либо материала в мельнице ударного типа определяется в первую очередь скоростью взаимодействия частиц измельчаемого материала с рабочими элементами мельницы. При этом одной из основных характеристик измельчаемости частиц при ударном нагружении является критическая скорость разрушения. Критическая скорость зависит в основном от прочностных характеристик измельчаемого материала и представляет собой оптимальную скорость нагружения, при которой происходит гарантированное разрушение частиц данного материала. Основное влияние на процесс ударного измельчения (в частности, на величину критической скорости разрушения) и на работу мельниц ударного действия оказывают физико-механические свойства (прочность, хрупкость, абразивность и т. д.), а также размер и форма частиц измельчаемого материала.

Однако в настоящее время еще не разработана единая теория определения критической скорости разрушения, более-менее удобная для использования при расчете рабочих параметров измельчительных установок. В частности, слабо освещен вопрос изменения критической скорости разрушения частиц материала в зависимости от их размера при помоле. Причем на фоне большого количества расчетных зависимостей, предлагаемых различными авторами для определения критической скорости разрушения материала, вполне логичным будет задаться вопросом о том, какая из вышеуказанных зависимостей дает наиболее точное представление для того или иного материала при сопоставлении расчетных данных с результатами экспериментальных исследований.

Условно работы, посвященные этой теме, можно разделить на две группы. К первой можно отнести исследования, связанные с определением критической скорости разрушения в зависимости от физико-механических характеристик исследуемых материалов без учета размеров измельчаемых частиц [1–5].

Рассмотрим наиболее значимые теоретические положения этой группы исследований.

В теории удара критическая скорость разрушения  $U_{кр}$ , м/с, частицы материала при ее свободном ударе о неподвижную поверхность определяется по общеизвестной методике, основанной на законе сохранения количества движения и импульса сил, и находится из следующей зависимости:

$$U_{кр} \geq \sqrt{\frac{\sigma_{сж(p)}^2}{\rho_m \cdot E \cdot (1 - \xi^2)}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{сж(p)}$  – предел прочности на сжатие (растяжение), Па;  $\rho_m$  – удельный вес материала, кг/м<sup>3</sup>;  $E$  – модуль упругости (модуль Юнга), Па;  $\xi$  – коэффициент восстановления после удара.

Однако успешное использование на практике формулы (1) в настоящее время сдерживается отсутствием точных данных для большинства материалов. Вследствие этого многие исследователи предлагают свои зависимости для расчета критической скорости разрушения ( $U_{кр}$ ) материала без учета коэффициента ( $\xi$ ).

Например, В.П. Горячкин и Г.И. Покровский на основании теоретических изысканий выводят следующую формулу для расчета критической скорости разрушения, м/с:

$$U_{кр} = \frac{\sigma_{сж(p)}}{E} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho_m}}, \quad (2)$$

где  $\sqrt{E/\rho_m} = U_{зв}$  – скорость звука в материале, м/с.

Исходя из положений этой теории, критическая скорость разрушения  $U_{кр}$  для какого-либо материала приблизительно во столько раз меньше скорости звука (скорость распространения упругих волн в материале), во сколько раз предел прочности на сжатие (растяжение) меньше модуля упругости. Причем для большинства горных пород отношение  $(\sigma_{сж(p)}/E) = 0,0001$ , скорость звука приблизительно составляет  $U_{зв} \approx 5000$  м/с, и, следовательно, критическая скорость составит величину  $U_{кр} \approx 0,5$  м/с. Таким образом, можно отметить, что формула (2) является недостаточно корректной для определения критической скорости разрушения  $U_{кр}$  материала.

В.П. Ромадин на основании всестороннего анализа контактной задачи Герца предлагает следующую зависимость для определения критической скорости разрушения материала, м/с, очень схожую с формулой (2):

$$U_{кр} = \left( \frac{\sigma_{сж(p)}}{E} \right)^{\frac{6}{5}} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho_m}} = \frac{\sigma_{сж(p)}^{6/5}}{\rho_m^{1/2} \cdot E^{7/10}} \quad (3)$$

Согласно данной зависимости, величина критической скорости разрушения  $U_{кр}$  определяется основными физико-механическими характеристиками измельчаемого материала, так как на практике зачастую очень трудно бывает определить действительные напряжения в частице материала.

Главным недостатком методик определения критической скорости разрушения материалов первой группы является то, что они не учитывают влияние размеров измельчаемых частиц, а следовательно, не могут быть использованы при проектировании измельчительных установок.

Ко второй группе можно отнести исследования [1, 6–8], устанавливающие зависимость между размерами измельчаемых материалов, их физико-механическими характеристиками и критическими скоростями разрушения. Работы данной группы более применимы для практических расчетов при определении оптимальных параметров рабочих органов помольных установок и выборе режимов обработки различных материалов.

Рассмотрим основные теоретические исследования этой группы.

Е. Рейнерс на основании экспериментальных исследований процесса измельчения шарообразных частиц материала предлагает следующую формулу для определения критической скорости разрушения, м/с:

$$U_{кр} = \sqrt{\frac{d^3 \cdot \sigma_{сжс(p)} \cdot g}{E \cdot P}}, \quad (4)$$

где  $d$  – исходный диаметр частицы материала, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $P$  – насыпной вес измельчаемого материала, Н.

Основными недостатками формулы (4) является то, что Е. Рейнерс проводил свои исследования путём выстреливания из дробеметной машины полированных стеклянных шаров идеальной формы и исключительной однородности по своим свойствам. В связи с этим действительные значения критических скоростей  $U_{кр}$  для обычных неоднородных материалов будут значительно меньше. Кроме того, данная зависимость неприменима для процессов помола, так как при уменьшении размеров частиц материала, поступающего на измельчение, значения расчетных критических скоростей уменьшаются, а в действительности происходит наоборот.

В.А. Стрельцов, В.А. Бауман и Б.В. Клушанцев на основании всесторонних теоретических и экспериментальных исследований процесса измельчения горных пород в роторных (молотковых) дробилках выводят следующую зависимость для определения критической скорости разрушения, м/с:

$$U_{кр} = B \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{\sigma_{сжс(p)}}{\rho_m \cdot d}\right)^2}, \quad (5)$$

где  $B$  – поправочный коэффициент, который зависит от конструктивных особенностей роторных (молотковых) дробилок и определяется опытным путем. По данным В.А. Стрельцова, коэффициент  $B = 37,6$ ; по данным В.А. Баумана –  $B = 7,7$ ; Б.В. Клушанцева –  $B = 175$ .

Как показывают представленные выше данные, поправочный коэффициент  $B$  не имеет строго определенного значения и варьируется в широких пределах. Данное об-

стоятельство существенно снижает практическую значимость выражения (5) для определения критической скорости разрушения  $U_{кр}$  материала.

Н.М. Смирновым на основании экспериментальных и теоретических исследований процесса тонкого помола в мельницах ударного действия материалов с различными прочностными характеристиками была разработана методика расчета критической скорости разрушения  $U_{кр}$  материалов как функции симплекса  $\sigma_{ср} / \rho_m$  и исходного диаметра частицы  $d$ , м/с:

$$U_{кр} = \frac{1,9 \cdot \left( \frac{\sigma_{ср}}{\rho_m} \cdot 10^{-4} + 1 \right)}{d^{0,4}}, \quad (6)$$

где  $\sigma_{ср}$  – предел прочности материала частицы на срез, Па.

По данным Н.М. Смирнова, уравнение (6) справедливо для частиц материала диаметром  $d = (6 \cdot 10^{-5} \div 1 \cdot 10^{-2})$  м и величины  $(\sigma_{ср} / \rho_m) = (1 \cdot 10^3 \div 8 \cdot 10^3)$  м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>.

Основной недостаток приведенных расчетных зависимостей второй группы для определения критических скоростей разрушения заключается в том, что они имеют поправочные коэффициенты, зависящие от способа измельчения и конструкции измельчителя. Вследствие этого при проектировании помольных установок возникают трудности, связанные с определением этих коэффициентов.

Для устранения данного недостатка нами была получена следующая зависимость определения критических скоростей разрушения в зависимости от физико-механических свойств и размеров частиц измельчаемого материала, м/с:

$$U_{кр} = \sqrt{\frac{\sigma_p}{M \cdot \rho_m \cdot d}}, \quad (7)$$

где  $M$  – число твердости по Моосу;  $d$  – размер измельчаемой частицы, м.

На фоне большого количества расчетных зависимостей для определения критической скорости разрушения  $U_{кр}$  материала (см. формулы (1–7)) вполне логичным будет задаться вопросом о том, какая из вышепредставленных зависимостей дает наиболее точное представление при сопоставлении расчетных данных с результатами экспериментальных исследований.

Чтобы ответить на данный вопрос, нами был выполнен расчет критической скорости разрушения для частиц гипсового камня, извести и кварцевого песка по вышеупомянутым методикам, а также проведен ряд практических исследований. Данные материалы были выбраны из-за значительных отличий в их физико-механических свойствах и широкого использования в процессах измельчения.

Для проведения экспериментов на кафедре МиАХиСП была сконструирована специальная помольная установка на базе дисмембратора. Внутри корпуса установки находится подвижный ротор, на котором по окружности в один ряд смонтированы рабочие органы в виде круглых пальцев. Помол проводился путем однократного пропускания исходного материала через мельницу при различных частотах вращения ротора (от 500 до 6000 мин<sup>-1</sup>). Для получения зависимости критической скорости разрушения от размера частиц материал перед измельчением и после рассеивался на наборе стан-

дартных сит по стандартной методике. Результаты проведенных исследований графически представлены на рисунке.

Как показали проведенные исследования, наиболее точными методиками расчета критических скоростей разрушения частиц материала являются зависимости, выраженные формулами (5, 6 и 7). Расхождение значений, подсчитанных по этим методикам, от реальных скоростей разрушения частиц в среднем составляло:

- по зависимости (5) – 20–25%;
- по зависимости (6) – 5–10%;
- по зависимости (7) – 6–11%.

Следовательно, можно сделать вывод о том, что для ориентировочных расчетов критических скоростей разрушения целесообразнее использовать зависимость (7) вследствие ее относительной простоты и достаточно высокой точности.

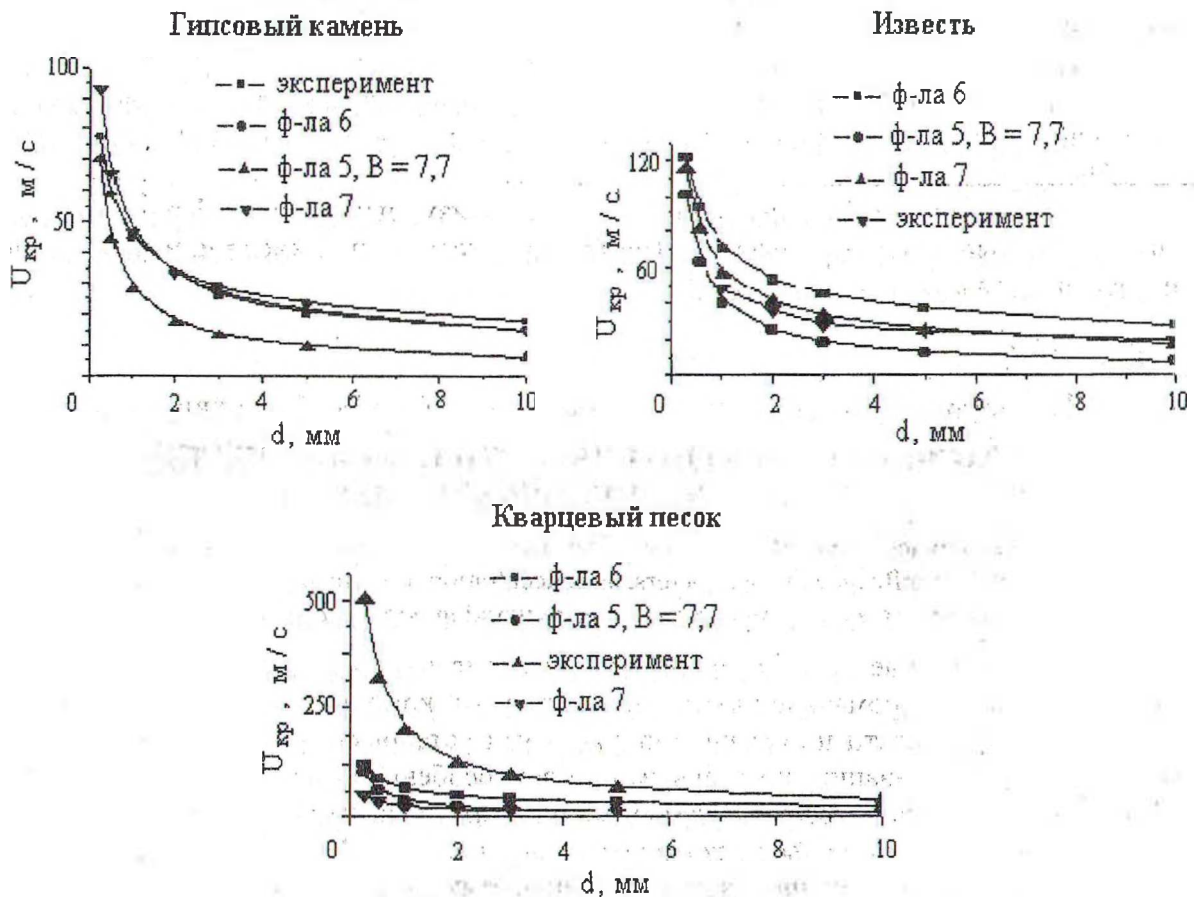


Рис. Изменение критической скорости разрушения различных материалов в зависимости от диаметра измельчаемых частиц

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гийо Роже. Проблема измельчения материалов и ее развитие. – М.: Стройиздат, 1964. – 225 с.
2. Доброхотов В.И., Левит Г.Т. Опыт эксплуатации и испытаний молотковых мельниц. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 104 с.
3. Данченков Ю.В. Тенденции развития молотковых мельниц с сепараторами и питателей сырого топлива. – М.: НИИинформэнергомаш, 1977. – 62 с.
4. Гутьяр Е.М. К объемной теории дробления // Изв. Московской с.-х. акад. им. Тимирязева. – 1981. – Вып. 4. – С. 163–166.
5. Современное помольное оборудование // Промышленность нерудных и неметаллорудных материалов. Сер. 7. Вып. 3: Обзор. информ. / Науч.-исслед. ин-т информ. и техн.-эконом. исслед. пром-ости нерудных материалов. – М., 1990. – 62 с.
6. Колобова В.В. Влияния вида и скорости диспергирования на технологические свойства порошков // Разработка теории и конструктивного оформления машин и аппаратов интенсивного действия с участием зернистых материалов: Межвуз. сб. науч. тр. / Ивановский хим.-технолог. ин-т. – Иваново, 1984. – С. 82–85.
7. Пугин К.Г. Определение параметров и производительности роторных мельниц интенсифицирующего действия: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.16 / МАДИ. – М., 1994. – 28 с.
8. Опыт применения центробежно-ударных измельчителей // Черная металлургия. Сер. 4. Вып. 1: Обзор. информ. / Центр. науч.-исслед. ин-т информ. и техн.-эконом. исслед. черной металлургии. – М., 1991. – 25 с.

УДК 621.926

В.Ю. Мурог, аспирант; П.Е. Вайтехович, доцент; Ю.М. Костюнин, доцент

### РАСЧЕТ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕЙ ДЕЗИНТЕГРАТОРНОГО ТИПА

The new technique of calculation of productivity dezintegrators and dismembrators is offered. The influence of such factors, as concentration of particles, shape and corner of the installation of a loading branch pipe, type of working bodies is taken into account.

Измельчители дезинтеграторного типа находят широкое применение в самых различных отраслях промышленности вследствие их компактности, относительно небольшой энергоемкости по сравнению с другими установками подобного назначения, простоты в обслуживании, но главным образом особенностей воздействия на обрабатываемые материалы, характеризующихся многократностью числа ударных воздействий на частицу материала при высоких скоростях ударов.

Однако, несмотря на широкое применение этих измельчителей, до сих пор возникают трудности с теоретическим определением их производительности при проектировании для конкретных промышленных условий.

На основании практических и теоретических исследований измельчителей данного класса рядом авторов [1–2] предложено несколько методик расчета их производительности.

При расчете пропускной способности измельчителей корзинчатого типа используется метод, предложенный И.А. Хинтом [1]. Расчет основан на том, что измельчитель может максимально принять столько материала, сколько может пропустить самый