

## НЕКОТОРЫЕ ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕЙ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ

*Гребенчук П.С., Левданский Э.И., Левданский А.Э.*

Процессы измельчения материалов находят широкое применение в различных производствах. Количество измельчаемого в год материала при производстве калийных удобрений, цемента и силикатных изделий, переработке зерна на пищевые и комбикормовые цели измеряется миллионами тонн.

Весьма существенным недостатком процесса измельчения является высокое энергопотребление. Удельный расход электроэнергии на измельчение 1 т материалов в вышеприведенных производствах близок к 10 кВт·ч или во много раз выше, например при производстве цемента. Следовательно, на осуществление процесса измельчения в республике затрачиваются сотни миллионов киловатт-часов электроэнергии и потому снижение энергопотребления на осуществление данного процесса является весьма актуальной задачей.

Способы измельчения материалов разнообразны, однако основными из них являются механические, такие как раздавливание, удар и истирание. Во многих работах [1, 2, 3] теоретически и экспериментально доказано, что работа измельчения ударом значительно ниже, чем раздавливанием, а самый высокий расход энергии наблюдается при измельчении истиранием. В настоящее время известно большое количество патентов на конструкции дробилок и мельниц ударного измельчения, однако промышленное применение нашли в основном четыре конструкции — это роторные, молотковые, дезинтеграторы (дисмембраторы) и ударно-центробежные. Конструктивно все эти агрегаты весьма близки, т. к. имеют ротор с рабочими элементами, а внутри корпуса вокруг ротора устанавливаются отбойные плиты (стержни и т. д.). В роторных измельчителях в качестве рабочих органов используются била, которые жестко закреплены на валу ротора, а в молотковых используются молотки, подвешенные на роторе

шарнирно. Измельчение в этих конструкциях происходит при скоростном ударе молотков или бил по кускам материала, а также при ударе об отражательные плиты или при соударении кусков между собой. В дезинтеграторах и дисмембраторах рабочими элементами являются пальцы, жестко закрепленные по концентрическим окружностям на дисках ротора. Ряд пальцев одного диска находится между рядами пальцев другого. В дезинтеграторах оба диска с пальцами вращаются в противоположных направлениях, а в дисмембраторах вращается один диск с пальцами, а второй является неподвижным. Измельчение в этих агрегатах происходит за счет многократных ударов пальцев по кускам материала при продвижении его от центра ротора к периферии.

Ударно-центробежные измельчители отличаются от предыдущих конструкций тем, что процесс дробления практически полностью перемещен с вращающегося ротора на периферическую отражательную поверхность. Ротор здесь представляет собой диск с лопатками или ребрами и выполняет в основном разгонную функцию. Для этого материал, подлежащий измельчению, подается в центр вращающегося диска и с помощью разгонных лопаток с высокой скоростью выбрасывается на отбойную поверхность плит, где за счет удара разрушается. Анализ рассмотренных измельчителей ударного действия показывает, что они имеют ряд преимуществ по сравнению с измельчителями других типов:

- более низкое удельное энергопотребление;
- высокую энергонапряженность в рабочей зоне, что обеспечивает высокую степень измельчения при низкой металлоемкости агрегата;
- получение продукта измельчения по форме близкой к кубу;
- простое и эффективное воздействие на гранулометрический состав продуктов измельчения путем изменения скорости вращения ротора;

- низкий уровень капитальных затрат;
- из-за простоты конструкции низкую трудоемкость технического обслуживания.

В то же время измельчители ударного действия имеют и недостатки, два из которых весьма существенны и заключаются в следующем:

- большой абразивный износ рабочих органов, особенно при переработке высокоабразивных материалов;
- большой разброс дисперсного состава продуктов измельчения.

Поэтому, несмотря на существенные преимущества измельчителей ударного действия, выше-названные недостатки длительное время сдерживали широкое их применение в производственных процессах.

Что касается абразивного износа, то некоторые исследователи высказывали мнение, что данные измельчители целесообразно использовать для измельчения материалов с твердостью не выше 4 по шкале Мооса. В то же время исследованиями установлено [4], что удельный расход металла на абразивный износ (износ, отнесенный к 1 т готового продукта) в измельчителях ударного действия одинаков или даже ниже по сравнению с удельным расходом в щековых дробилках или шаровых мельницах [4]. Однако масса рабочих органов измельчителей ударного действия во много раз меньше по сравнению, например, с массой мелющих тел в барабанной шаровой мельнице, следовательно, наработка рабочих органов и межремонтный срок также резко уменьшаются. Это приводит к частым остановкам для восстановления или замены изношенных деталей. Увеличение срока службы рабочих органов ударных измельчителей является весьма актуальной задачей, которую исследователи пытаются решить путем применения износостойких материалов и конструктивных усовершенствований. Из износостойких материалов наиболее широкое применение получила высокомарганцовистая сталь типа 110Г13Л. У этой стали твердость поверхностного слоя под давлением в 3 раза выше, чем у стали Ст3. Еще больше увеличивается ресурс этой стали при ее легировании ванадием. При помоле продуктов средней твердости хорошие результаты получаются с использованием белых чугунов и в особенности легированных никелем или хромом до 15 % и молибденом до 3 %. В последнее время широкое распространение находит защита рабочих органов и корпуса путем наплавки электродуговой и газовой сваркой высокотвердых износостойких наплавочных

материалов на основе карбидов, боридов, никеля, титана. Особенно широкое применение находят сплавы типа ВК (на основе вольфрама) [4].

Одним из возможных путей продления межремонтного срока службы рабочих органов измельчителей ударного действия является создание таких конструкций, в которых измельчающие элементы работали бы под защитным слоем из измельчаемого материала. Конструкция такой дробилки создана фирмой «Бармак Эссошиэйтед» (Новая Зеландия) на базе ударно-центробежного измельчителя с вертикальным валом, т. е. с горизонтальным ротором. В этой конструкции лопадки ротора заканчиваются тупиком, в результате чего при работе на них образуется слой самофутеровки из измельчаемого материала. Наличие в нижней части отражательной стенки кольцевой площадки также создает на этой стенке слой самофутеровки. Таким образом, измельчение в такой дробилке происходит по принципу «камень о камень», что значительно снижает абразивный износ рабочих органов и увеличивает во много раз межремонтный срок ее эксплуатации. Конечно, эффективность использования кинетической энергии кусков материала на их разрушение в дробилках «камень о камень» несколько ниже, чем в дробилках без самофутеровки, измельчение в которых основано на принципе «камень о металл».

Учитывая достоинства измельчителей ударного действия и используя рассмотренные способы защиты от абразивного износа фирмы многих стран, например США, Великобритании, Германии, Австрии, НПО «Центр» (г. Минск) освоили их серийное производство, что позволило найти им применение при измельчении самых различных материалов. Следует отметить, что из всех конструкций измельчителей ударного действия наиболее широкое применение начали находить измельчители ударно-центробежного типа, в которых процесс измельчения вынесен с ротора и полностью осуществляется на отражательной стенке.

Как указывалось ранее, весьма важным недостатком измельчителей ударного действия является большая неоднородность измельченного материала по дисперсному составу. Особо большие нарекания у производственников на работу молотковых измельчителей, т. к. измельченный продукт в этих агрегатах состоит из частиц от микронного размера до кусков с размером, близким к размерам исходного материала.

Для выяснения причины большого разброса по дисперсности продукта, измельченного в

ударных мельницах, нами проведен анализ работ по ударному разрушению материалов, а также проведены дополнительные исследования. В результате анализа установлено, что при ударе на распределение местных напряжений и деформацию оказывают существенное влияние продольные, поперечные и поверхностные волны. Скорость распространения волн равна скорости звука в данном материале. При достаточном запасе энергии за упругими волнами следует фронт разрушения. Первичные трещины и изломы берут начало от центра удара. Вторичные трещины и изломы не исходят из центра удара, а образуются при отражении упругой волны и волны разрушения, при торможении и отражении волн от зон структурной неомогенности. Представление о характере измельчения частицы ударом дает модель разрушения шарика, предложенная И. Примером [5] (рис. 1), впоследствии подтвержденная экспериментальными исследованиями Е. Рейнерса и Г. Шлауга [6]. Согласно этой модели, в зоне ударного контакта образуется конус тонкоизмельченного продукта 1. Причем величина этого конуса и размер образующихся частиц прямо пропорциональны скорости удара. С противоположной стороны наблюдается остаточный конус 2, который в основном не разрушается. Между конусами образуется зона боковых осколков 3. Следует еще раз отметить, что величина этих трех зон зависит в основном от скорости удара.

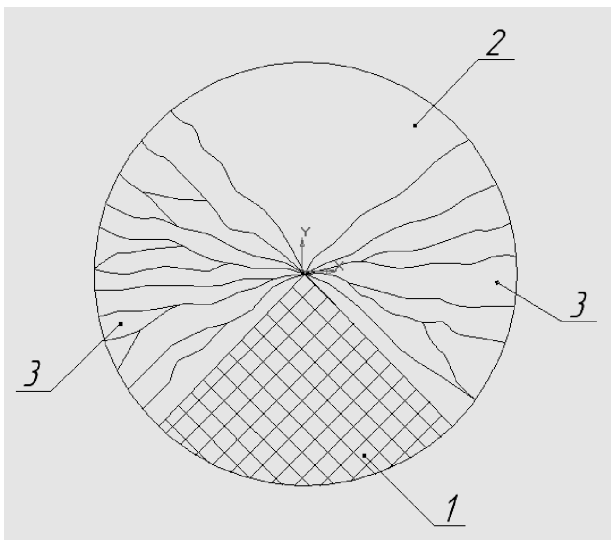


Рис. 1. Схема разрушения шара при ударе по И. Примеру:

1 — зона тонкоизмельченного продукта; 2 — зона остаточного конуса; 3 — зона боковых осколков

Например, опыты со стеклянными шариками показали, что при очень высокой скорости удара  $v > 400$  м/с зона тонкого измельчения охватывает практически полный объем шарика.

Процесс ударного разрушения не является мгновенным, а происходит во времени, хотя величина этого времени исчисляется миллисекундами. В начале происходит разрушение материала на мелкие частицы в зоне контакта со стенкой, а затем — разрушение остальной части куска на осколки. Следовательно, мелкие частицы разлетаются из зоны контакта вдоль отрагательной поверхности и потом крупные осколки из второй и третьей зон отскакивают от отрагательной поверхности. Таким образом, из данного анализа ударного разрушения следует:

- получить тонкодисперсный продукт однократным ударным нагружением можно только при очень высоких скоростях удара. Обеспечивать скорость удара выше 400 м/с экономически невыгодно, т. к. для придания кускам измельчаемого материала высокой скорости потребуются затрачивать большое количество энергии. Кроме того, такую задачу трудно решить технически;

- экономически наиболее целесообразно осуществлять ударное измельчение при умеренных ударных нагрузках с повторным ударным нагружением недоизмельченных крупных кусков и непрерывным отводом из рабочей зоны измельчения готовой мелкой фракции.

Естественно, возникает вопрос определения оптимальной скорости удара, на величину которой будет оказывать влияние большое количество факторов, таких как физико-механические свойства измельчаемого материала, его структура, размер кусков и их форма, конструктивные особенности измельчителя и т. д. Следовательно, для каждого материала оптимальная скорость удара будет своя и ее можно определить только экспериментально. Ясно одно: она должна быть выше критической скорости  $v_k$ , при которой начинается разрушение материала.

Известно множество работ по определению критической скорости  $v_k$  при ударном разрушении и предложено большое количество зависимостей для ее определения. Однако в основу всех зависимостей положена формула, полученная академиком В.П. Горячкиным [7]:

$$v_k = \frac{\sigma_p}{\sqrt{\rho E}},$$

где  $\sigma_p$  — предел прочности материала на растяжение;  $\rho$  — плотность материала;  $E$  — модуль упругости.

В то же время на критическую скорость начала разрушения также оказывают влияние все вышеперечисленные факторы, которые при теоретических расчетах учесть практически невозможно. Таким образом, получить достоверные данные по критической скорости разрушения конкретного материала также можно только экспериментально.

Дальнейшие наши исследования были направлены на создание ударно-центробежной мельницы, в которой крупные осколки продуктов измельчения после первого удара подвергались бы дополнительному ударному нагружению при непрерывном отводе из рабочей камеры готового продукта. Разработанная конструкция представлена на рис. 2 [8]. Она состоит из вертикального цилиндрического корпуса 1, футерованного внутри отражательными стержнями 2, и ротора, закрепленного на валу

электродвигателя 3 и состоящего из диска 4 с разгонными лопатками 5 и отбойными лопатками 6. Загрузка исходного материала в центр ротора осуществляется через воронку 7 в крышке 8. Выгрузка готового продукта производится через спиралеобразный полукольцевой канал 9 в днище 10.

При работе мельницы материал вместе с воздухом попадает в каналы ротора, разгоняется до высоких скоростей и ударяется об отражательные стержни. После удара мелкоизмельченные частицы под воздействием силы тяжести и воздушного потока опускаются вниз вдоль поверхности отражательных стержней, а крупные осколки отскакивают от стенки, попадают под удар лопаток ротора и снова отбрасываются на отражательную стенку. Но поскольку на осколки воздействует нисходящий вращающийся воздушный поток, то

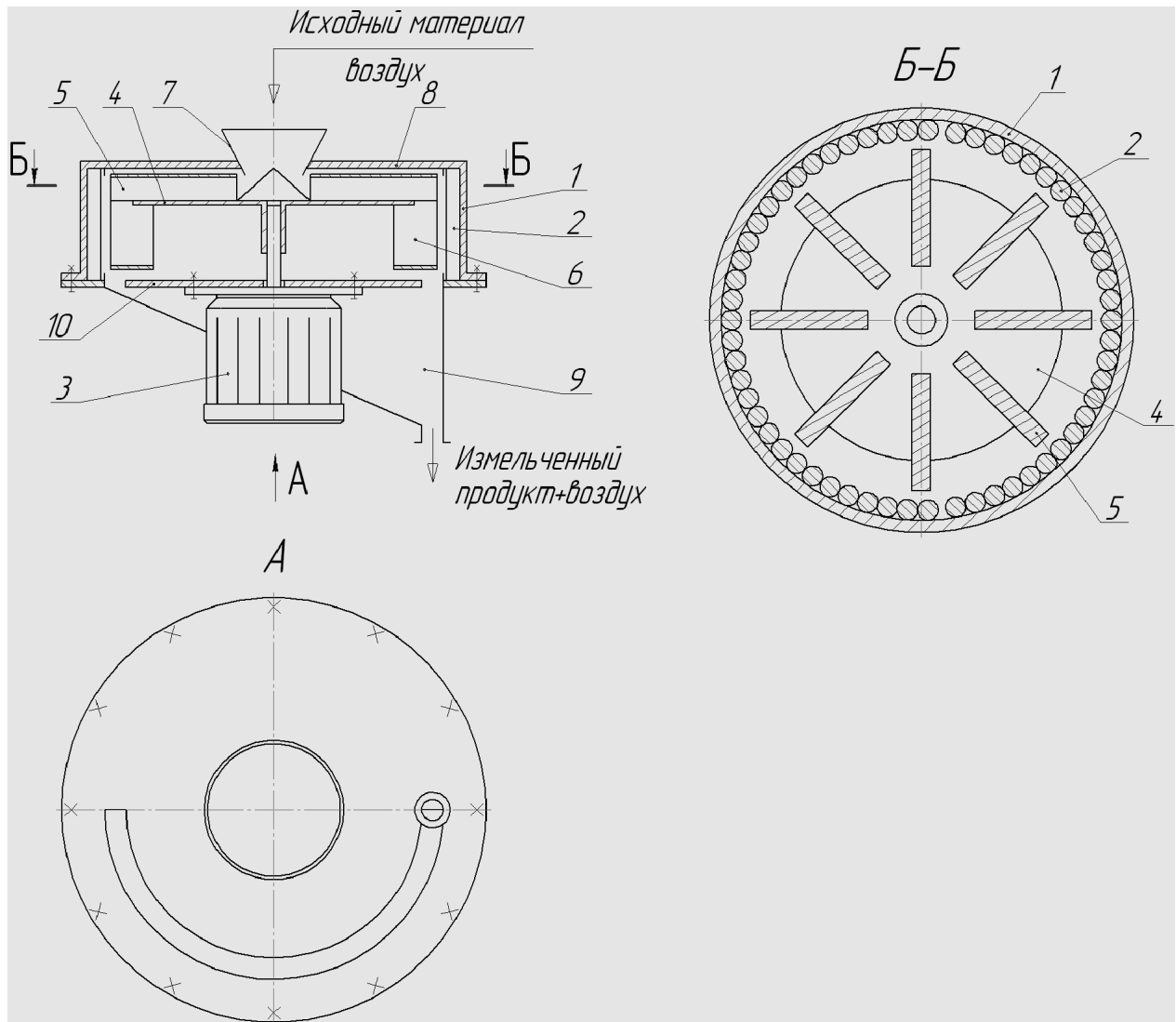


Рис. 2. Ударно-центробежная мельница селективного многократного разрушения

они несколько опустятся вниз и попадут уже под воздействие не разгонных, а отбойных лопаток. Таким образом, в этой конструкции при умеренной скорости вращения ротора крупные частицы материала подвергаются многократному ударному измельчению, а тонкодисперсный продукт непрерывно опускается вниз и через кольцевой канал выводится из агрегата.

На рис. 3 приведены результаты экспериментальных исследований в виде графических зависимостей дисперсного состава продуктов измельчения зерна ячменя при различной высоте отражательных лопаток (кривые 1, 2, 3) при скорости вращения ротора ударно-центробежной мельницы  $n_p = 2820$  об./мин. Здесь же для сравнения приведен дисперсный состав продуктов измельчения зерна ячменя в молотковой дробилке (кривая 4). Как видно из графика, наличие в нижней части ротора отбойных лопаток значительно повышает качество измельчения материала, продукт получается более однородным по дисперсному составу. При этом количество переизмельченного продукта (размер фракций меньше 0,15 мм) по сравнению с измельчением в молотковой дробилке как минимум в 2 раза меньше, что также является положительным фактором при измельчении зерна на фуражные цели.

Таким образом, сделанные нами теоретические предположения о необходимости отбойных лопаток на роторе полностью подтверждаются опытными данными. В ходе исследований также было выявлено, что увеличение высоты отбойных лопаток более чем в 2 раза по сравнению с высотой разгонных нецелесообразно, т. к. не приводит к заметному изменению качества готового продукта.

### Литература

1. Селективное разрушение минералов / В.И. Ревнивцев [и др.]; под ред. В.И. Ревнивцева. — М.: Недра, 1988. — 287 с.
2. Богданов, В.С. Современные измельчители: характеристика и оценка для процесса помола клинкера / В.С. Богданов, В.З. Пироцкий // Цемент и его применение. — 2003. — № 4. — С. 10–15.
3. Опыт применения центробежно-ударных дробилок // Черная металлургия: обзорн. информ. Серия обогащения руд. — 1991. — 25 с.
4. Клейс, И.Р. Износостойкость элементов измельчителей ударного действия / И.Р. Клейс, Х.Х. Ууэмыйс. — М.: Машиностроение, 1986. — 286 с.
5. Priemer, J. Untersuchungen zur Prallzerkleinerung von Einzelteilchen / J. Priemer // Fortschr. Ber. VDI. — Z, Reihe 3. — 1968. — Vol. 8. — P. 64–72.
6. Reiners, E. Der Mechanismus der Prallzerkleinerung beim geraden zentralen Stob und die Anwendung diesen Beanspruchungsart bei der Lerkleinerung, insbesondere bei der selektiven Lerkleinerung ven spoden stiffen / E. Reiners. — Westdeutsche Verlag, Koln und Opladen, 1977. — 649 p.
7. Демидов, А.Р. Измельчающие машины ударного действия / А.Р. Демидов, С.Е. Чирков // обзор. информ. — М., 1969. — 70 с.
8. Мельница: пат 9942 Респ. Беларусь, МПК6 В 02С 13/00 / Э.И. Левданский [и др.]. — № а 20050439; заявл. 05.05.05; опубл. 28.02.07 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. — 2007. — № 2. — С. 74.

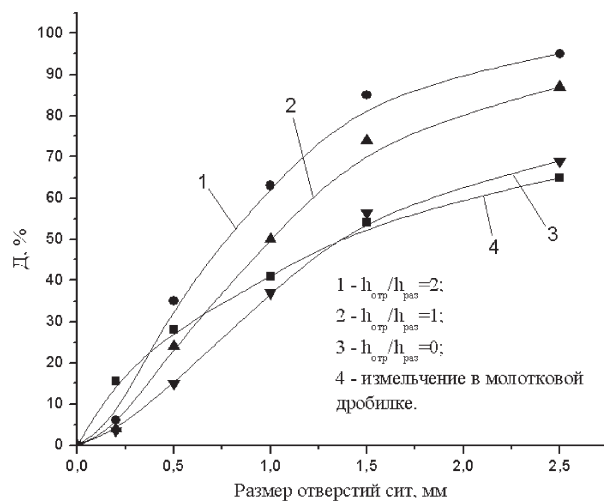


Рис. 3. Влияние высоты отражательных лопаток на дисперсный состав продуктов измельчения зерна ячменя при  $n_p = 2820$  об./мин ( $v_r = 68,8$  м/с)

Новая конструкция ударно-центробежной мельницы оказалась весьма востребованной в отечественной промышленности и сельском хозяйстве. В настоящее время осуществлен ряд внедрений ее для измельчения зерна, растительного и минерального сырья. На всех предприятиях отмечается ее высокая надежность, простота обслуживания, соответствие всем требованиям по качеству готового продукта. При этом по сравнению с молотковыми измельчителями удельный расход электроэнергии не менее чем на 30 % ниже. Результаты внедрений позволяют говорить о перспективах широкого использования этой конструкции ударно-центробежной мельницы в будущем.