

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Сельское хозяйство Республики Беларусь: стат. сб. – Мн: Информстат Минстата РБ, 1998. – С. 287.  
 2. Бакач, Н.Г. Современные технологии и машины для улучшения естественных и окультуренных сенокосов и пастбищ/ Н.Г. Бакач, В.К. Клыбик, С.П. Кострома. – Мн: РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», 2006. – 15с.  
 3. Кондратьев, В.Н. Косилки бильного типа. Вопросы проектирования и эксплуатации: пособие/ В.Н. Кондратьев. – Мн: РУП «БелНИИ мелиорации и луговодства», 2002. – 40с.  
 4. Бобко, В.Н. Краткий обзор конструкций зару-

бежных косилок-измельчителей/ В.Н. Бобко// Инженерный вестник. – 2008. – №1. – С.48-50.  
 5. Всероссийский авторесурс. Производители-партнеры. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rus-parts.ru>. – Дата доступа: 25.04.2007.  
 6. ООО «АГРОИМП»: каталог продукции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.agroimp.ru>. – Дата доступа: 13.04.2007.  
 7. Бильная косилка: пат. 4804 Респ. Беларусь, МПК (2006) А 01D 34/00 /В.Н. Кондратьев, В.Н. Бобко; заявитель Бел. гос. агрн. техн. университет. – № и 20080133; заявл. 21.02.2008; опубл. 30.10.2008 // Офиц. бюл. / Нац. центр интеллект. собств. – 2008. – № 5. – С. 159-160.

УДК 666.942

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 29.03.2010

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЙ  
КОНСТРУКЦИИ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ ФУРАЖНОГО ЗЕРНА**

**Э.И. Левданский, докт.техн. наук, профессор, П.С. Гребенчук, ассистент, А.Э. Левданский, докт.техн.наук (БГТУ)**

**Аннотация**

*Описана новая конструкция ударно-центробежной мельницы, созданная с учетом основных требований, предъявляемых к измельчителям ударного действия, проанализировано влияние ее основных конструктивных параметров на эффективность измельчения зерна. Представлены результаты экспериментальных исследований по измельчению различных видов зерна в новой конструкции мельницы, показывающие ее преимущества при измельчении фуражного зерна по сравнению с используемыми в настоящее время измельчителями молоткового типа.*

*The new design of a dispatch-centrifugal mill is described, created subject to the basic requirements, shown to grinders of shock action, influence of its basic design data on efficiency of crushing grain is analysed. Results of experimental researches on crushing of various kinds of grain in the new design mills showing its advantages at crushing of fodder grain in comparison with grinders now in use hammer of type are presented.*

**Введение**

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 тонны 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 кВт·ч электроэнергии и потому снижение энергопотребления на осуществление данного процесса является весьма актуальной задачей.

**Основная часть**

**Анализ конструкций современных  
измельчителей ударного действия**

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 имеется 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, так как 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 вышеупомянутых 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;
- низкую трудоемкость технического обслуживания из-за простоты конструкции.

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, вышеназван-

ные недостатки длительное время сдерживали широкое их применение в производственных процессах.

Что касается абразивного износа, то некоторые исследователи высказывали мнение, что измельчители ударного действия 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 тонне 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 высокопрочных износостойких наплавочных материалов на основе карбидов, боридов, никеля, титана. Наиболее широкое применение находят сплавы типа ВК (на основе вольфрама) [4].

Для измельчения фуражного зерна наибольшее распространение получили измельчители молоткового типа. Они выгодно отличаются от многих других конструкций измельчителей высокой надежностью, простотой ремонта и технического обслуживания, высокими производительностью и степенью измельчения материала. Основными их недостатками, как и для всех измельчителей этого типа, являются высокий износ рабочих органов (молотков) и неоднородность дисперсного состава продуктов измельчения. Последняя проблема для производителей стоит наиболее остро, так как измельченный продукт в молотковых измельчителях состоит из частиц от микронного размера до кусков с размером, близким к размерам исходного материала. Традиционно она решается установкой в нижней части корпуса измельчителя, под ротором классифицирующего элемента (сетки или перфорированной решетки). Таким образом, крупные недо-

измельченные куски материала могут попадать под повторное воздействие измельчающих элементов. Однако в таких конструкциях измельчение в значительной степени происходит за счет циркуляционного истирания и, таким образом, резко увеличивается содержание в готовом продукте тонкодисперсных переизмельченных частиц и, как следствие, значительно возрастает энергопотребление. Еще одним отрицательным фактором является быстрый износ перфорированных решеток и необходимость их частой замены.

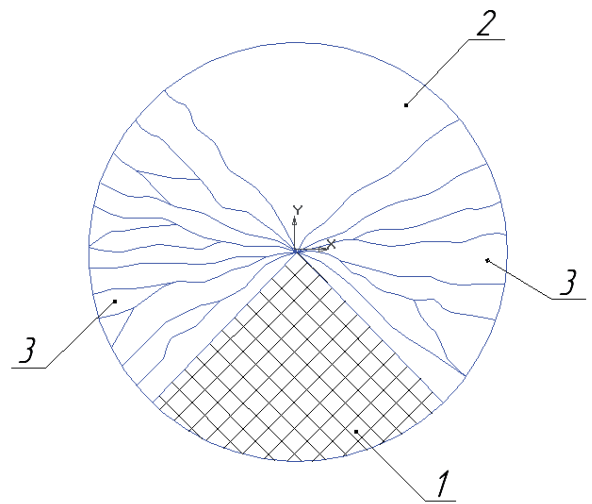
Как указывалось ранее, весьма важным недостатком измельчителей ударного действия является большая неоднородность измельченного материала по дисперсному составу. Для выяснения причины данной особенности авторами проведен анализ работ по ударному разрушению материалов, а также проведены дополнительные 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. 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 отражательной поверхности, и потом крупные осколки из второй и третьей зон отскакивают от отражательной 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, так как для придания кускам измельчаемого материала высокой скорости потребуется затратить 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,



*Рисунок 1. Схема разрушения шара при ударе по И. Примеру:*

*1 – зона тонкоизмельченного продукта; 2 – зона остаточного конуса; 3 – зона боковых осколков*

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.

#### Разработка и исследование новой конструкции ударно-центробежной мельницы

Дальнейшие исследования авторов 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 так как на осколки воздействует нисходящий вращающийся воз-

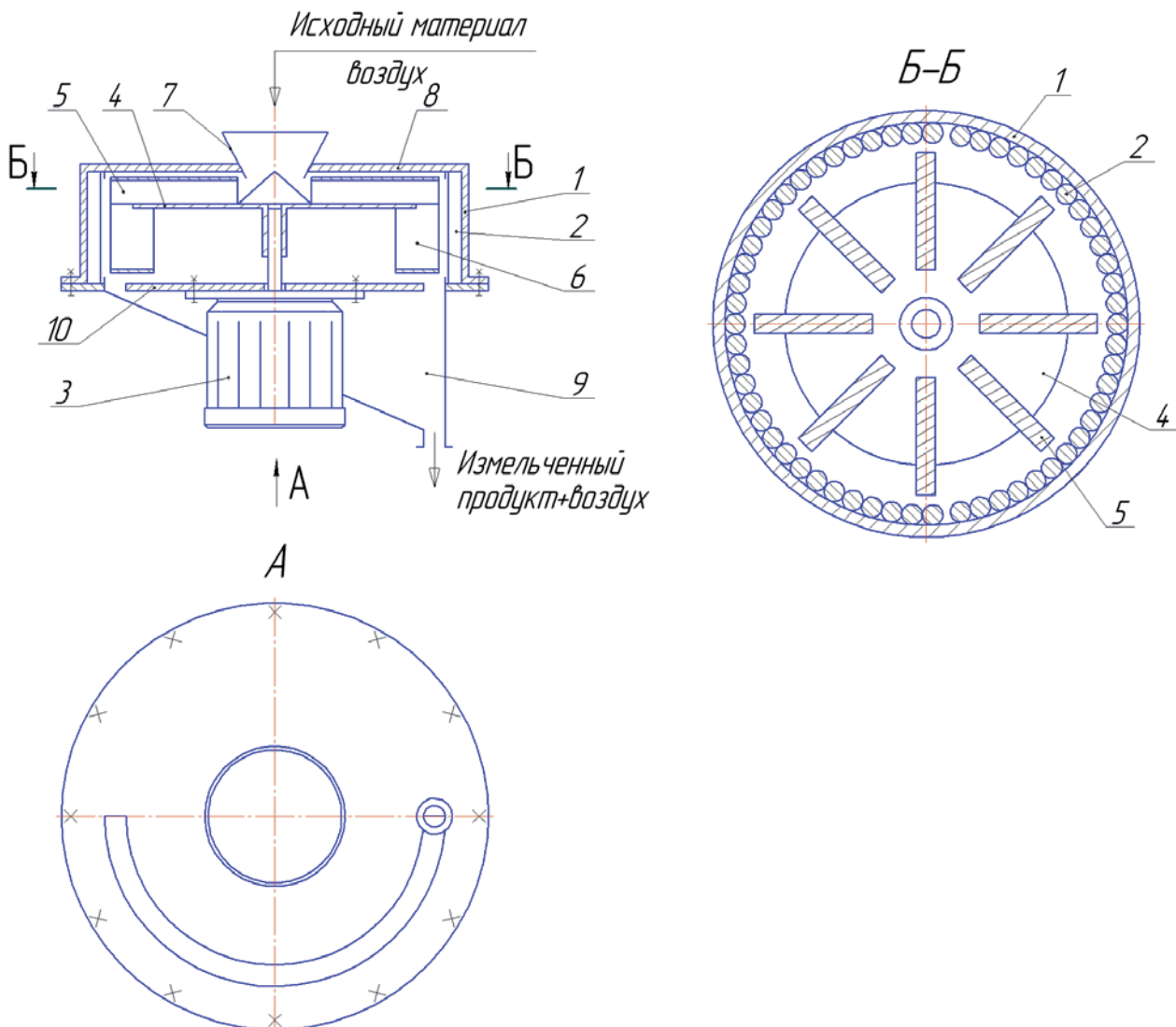


Рисунок 2. Ударно-центробежная мельница селективного многократного разрушения

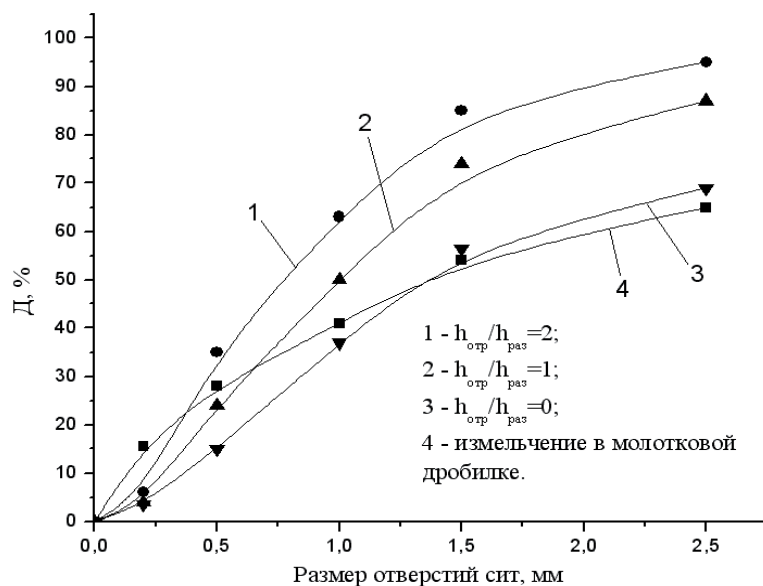


душный поток, то они несколько опускаются вниз и попадут уже под воздействие не разгонных, а отбойных лопаток. Таким образом, в этой конструкции при умеренной скорости вращения ротора крупные частицы материала подвергаются многократному ударному измельчению, а тонкодисперсный продукт непрерывно опускается 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.

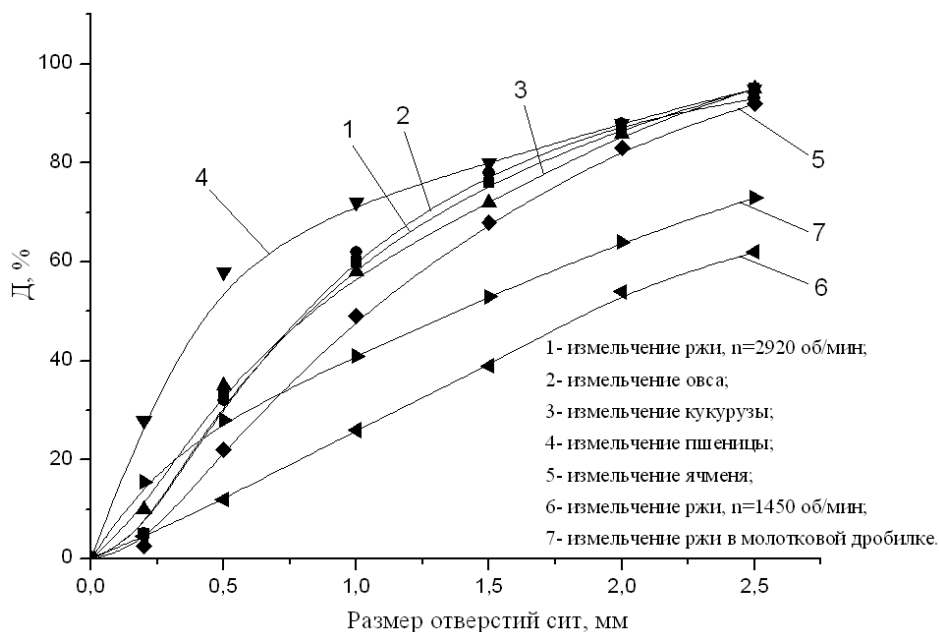
Таким образом, сделанные авторами теоретические предположения о необходимости отбойных лопаток на роторе полностью подтверждаются опытными данными. В ходе исследований также было выявлено, что увеличение высоты отбойных лопаток более чем в 2 раза по сравнению с высотой разгонных – нецелесообразно, так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

На рис. 4 представлены результаты экспериментальных исследований по измельчению различных зерновых культур в новой конструкции ударно-центробежной мельницы. Влажность зерна для всех культур составляла около 13%. Скорость вращения ротора мельницы



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

принималась 2820 об/мин. Из графика видно, что дисперсный состав продуктов измельчения ржи, овса, кукурузы (кривые 1, 2, 3 соответственно) практически одинаковый и основная масса продукта (около 80%) имеет размеры 0,15–2 мм, что соответствует требованиям комбикормовых производств. В то же время при измельчении зерна пшеницы (кривая 4) значительная часть продукта получается переизмельченной, поэтому ее следует измельчать при более низких оборотах ротора. Зерно ячменя, как видно из графика (кривая 5), измельчается сложнее всего. Это связано со структу-



*Рисунок 4. Дисперсный состав продуктов измельчения различных зерновых культур*

рой самой зерновки, которая имеет несколько эластичных оболочек и весьма прочную клетчатку. Однако в целом продукт измельчения зерна ячменя также соответствует всем требованиям, предъявляемым к фуражному зерну. Следует отметить, что количество переизмельченных частиц, имеющих размер менее 0,15 мм, не превышает 4%, а продукт, имеющий размеры более 2 мм, состоит в основном из оболочек зерновок (отрубей), которые очень трудно поддаются измельчению, и в то же время имеют низкую питательную ценность. На графике для сравнения представлен дисперсный состав продуктов измельчения зерна ржи в молотковой дробилке (кривая 7). Легко убедиться, что здесь наблюдается большой разброс дисперсного состава продуктов измельчения и выход целевого продукта (0,15–2 мм) не превышает 60% при значительном увеличении количества переизмельченных фракций. Таким образом, преимущества использования новой конструкции ударно-центробежной мельницы очевидны.

Новая конструкция ударно-центробежной мельницы оказалась весьма востребованной в отечественном производстве и, прежде всего, в сельском хозяйстве. В настоящее время осуществлен ряд внедрений ее для измельчения различных видов 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 на 30% ниже. Успешно проведены испытания мельницы производительностью 7 т/ч при измельчении свежееубранной кукурузы с влажностью 30-35%. Результаты внедрений позволяют говорить о перспективах широкого использования этой конструкции ударно-центробежной мельницы в будущем.

#### Заключение

Проведен анализ используемых в настоящее время конструкций измельчителей ударного действия, выявлены их недостатки и основные направления совершенствования.

Предложена новая конструкция ударно-центробежной мельницы метательного типа, отличающаяся низким энергопотреблением и равномерностью дисперсного состава продукта измельчения.

Проведенные экспериментальные исследования по измельчению фуражного зерна показали преимущества нового измельчителя перед используемыми ныне конструкциями и позволили осуществить ряд внедрений его в производство.

#### 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: обзор. информ. // Черная металлургия: сер. 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. – S. 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 Lerklinerung ven spoden stiffen / E. Reiners. – Westdeutsche Verlag, Koln und Opladen, 1977. – 649 s.
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, А.Э. Левданский, П.С. Гребенчук, С.Э. Левданский. – № а 20050439; заявл. 05.05.05; опубл. 28.02.07 // Афіцыйны бюл. / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 2. – С. 74.

## Измеритель влажности сырья ИВС-1



Измеритель влажности предназначен для экспресс-измерения влажности сырья (зерна, муки, макаронного теста, готовых макарон, сухарей и т.д.) в лабораторных и перерабатывающих цехах. Прибор обеспечивает измерения влажности от 5 до 40% при изменении основной погрешности от 0,5 до 1,5%. Быстрый контроль влажности сырья, например, при производстве макарон позволяет уменьшить расход муки, снизить риск выхода из строя технологического оборудования, не допустить пересушки макарон и тем самым сократить расход энергии и себестоимость производства.

Автор: Корко В.С., кандидат технических наук, доцент