

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 621.926

**ГРЕБЕНЧУК**  
**Павел Сергеевич**

**СЕЛЕКТИВНОЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ  
В ЦЕНТРОБЕЖНОЙ МЕЛЬНИЦЕ МНОГОКРАТНОГО  
УДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

Минск 2011

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет».

**Научный руководитель** Левданский Эдуард Игнатьевич,  
доктор технических наук, профессор кафедры машин и аппаратов химических и силикатных производств учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»

**Официальные оппоненты:** Ловкис Зенон Валентинович,  
доктор технических наук, профессор, член-корреспондент НАН Беларуси, генеральный директор РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию»;

Турко Михаил Романович,  
кандидат технических наук, заведующий технологической лабораторией Белорусского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института горной и химической промышленности ОАО «Белгорхимпром»


**Оппонирующая организация** Научно-исследовательское республиканское унитарное предприятие «НИИСМ»

Защита состоится 6 декабря 2011 г. в 14.00 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.08.02 при УО «Белорусский государственный технологический университет» (Беларусь, 220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а) в аудитории 240 корп. 4. Тел. 226-00-39; факс (017) 227-62-17, электронная почта: root@bstu/unibel.by/

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке УО «Белорусский государственный технологический университет».

Автореферат разослан « 01 » ноября 2011 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций  
доктор технических наук, доцент

 Левданский А.Э.

## ВВЕДЕНИЕ

Процессы измельчения широко используются в химической и других родственных отраслях промышленности. Измельчению подвергаются исходное сырье, промежуточные продукты, а иногда и готовый продукт. Особенностью данного процесса является высокая энергоемкость. В ряде производств мощность привода мельниц составляет тысячи киловатт. Большая мощность привода объясняется не только значительными объемами измельчаемого материала, но и низким КПД агрегатов, применяемых для этих целей. Многие конструкции, например молотковые измельчители, не позволяют получать продукт измельчения узкого дисперсного состава, что отрицательно сказывается на последующих технологических процессах. Существенным недостатком некоторых измельчителей является большая металлоемкость, которая измеряется сотнями тонн высококачественной стали. Поэтому создание новых способов измельчения и на их основе – энерго- и ресурсосберегающих измельчителей является весьма актуальной задачей.

Одним из наиболее перспективных направлений совершенствования техники измельчения является использование ударно-центробежного способа измельчения, что подтверждается заключениями международных конгрессов по измельчению.

Совершенствование способа ударно-центробежного измельчения, разработка новых конструкций для его осуществления и всестороннее их изучение определили тему исследований, изложенных в данной работе.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Связь работы с крупными научными программами, темами.* Исследования, выполненные по теме диссертации, проводились в рамках государственных тем: ГБ 36 – 01 «Разработка и исследование высокоэффективных машин и аппаратов» (№ госрегистрации 19981012, 2000–2005 гг.), ГБ 26 – 06 «Разработка, исследование и моделирование высокоэффективных машин и аппаратов» (№ регистрации 20064128, 2006–2010 гг.), а также БС 10 – 426 «Разработать исходные требования и техническое задание на проектирование и изготовление опытного образца измельчителя для сухого помола зерна» и ИФЗ 10 – 449 «Провести исследования и разработать конструкцию опытного образца промышленной мельницы для измельчения зерновых культур при производстве этилового спирта на Бродницком крахмальном заводе, структурном подразделении РПУП «Брестский ликеро-водочный завод «Белалко»».

*Цель и задачи исследований.* Целью диссертационной работы является совершенствование процессов и агрегатов ударной дезинтеграции для получения продуктов измельчения узкой дисперсности при низком энергопотреблении. Исследования направлены прежде всего на совершенствование процессов дезинтеграции силикативной руды, фуражного зерна, являю-

БЕЛОРУССКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

1526 ah

щихся крупнотоннажными, энергоемкими и имеющими жесткие требования к дисперсности продукта измельчения.

Основные научные и прикладные задачи исследований, решение которых обеспечивает достижение поставленной цели:

1. Установить на основании анализа работ по теории и практике ударной дезинтеграции причины большого разброса размеров частиц измельченного материала в промышленных агрегатах ударного измельчения.

2. Разработать основы рациональной организации избирательной ударной дезинтеграции многокомпонентных материалов.

3. Исследовать теоретически и экспериментально движение кусков измельчаемого материала в рабочей зоне мельницы и определить на основании этого влияние конструктивных и технологических параметров измельчителя.

4. Создать на основе полученных результатов исследований принципы конструирования новых ударно-центробежных мельниц для осуществления рационального способа избирательной ударной дезинтеграции многокомпонентных материалов.

#### ***Положения, выносимые на защиту.***

1. Способ ударной дезинтеграции и агрегат для его осуществления, основанные на селективном измельчении умеренными ударными нагрузками, являющимися оптимальными для данного материала, и дополнительном многократном нагружении образующихся крупных фракций, что позволяет получать продукт измельчения узкого дисперсного состава при низком энергопотреблении.

2. Закономерности движения частиц измельчаемого материала, определяющие их динамические характеристики на различных стадиях перемещения в измельчителе с учетом формы профиля и углов установки разгонных лопаток и отражательной поверхности, которые позволили определить рациональные геометрические параметры рабочих органов мельницы новой конструкции.

3. Аналитические зависимости для расчета потребляемой мощности и определения производительности ударно-центробежной мельницы новой конструкции, учитывающие прочностные свойства измельчаемого материала и конструктивные особенности рабочих органов.

4. Обоснование возможности достижения полного раскрытия зерен силвинита при более крупных размерах измельченных частиц за счет применения селективной ударной дезинтеграции, что позволяет уменьшить количество переизмельченных фракций, увеличить степень извлечения целевого продукта при значительном снижении энергопотребления.

5. Экспериментальное обоснование возможности увеличения более чем в 2 раза выхода целевого продукта требуемой дисперсности при измельчении прессата хлористого калия на стадии его гранулирования, а также возможности измельчения фуражного зерна с получением измельченного про-

дукта требуемой дисперсности при снижении энергопотребления более чем на 30%.

**Личный вклад соискателя.** Все результаты работы получены соискателем самостоятельно. Соискатель принимал участие в постановке задач исследований. Им проведен анализ работ по исследуемому вопросу, определены пути дальнейшего совершенствования техники ударного измельчения. Соискатель принимал активное участие в разработке нового способа ударного измельчения и агрегатов для его осуществления. Автором спроектирована и изготовлена лабораторная полупромышленная мельница, проведены экспериментальные исследования, обработаны опытные данные с получением математических зависимостей для расчета новых конструкций измельчителей, осуществлено проектирование промышленных образцов мельниц, курировалось их изготовление, также он активно участвовал в промышленных испытаниях.

**Апробация результатов диссертации.** Результаты исследований докладывались на следующих конференциях: Международная научно-техническая конференция «Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии» (Минск, 2005); Международная научно-техническая конференция «Наука и технология строительных материалов: состояние и перспективы развития» (Минск, 2005); Республиканская научная конференция «НИРС – 2005» (Минск, 2005); 70-я научно-техническая конференция (БГТУ, Минск, 2006); 71-я научно-техническая конференция (БГТУ, Минск, 2007); Международная научно-техническая конференция «Энерго- и ресурсосберегающая технологии и оборудование, экологически безопасные технологии» (Минск, 2008).

**Опубликованность результатов.** Основные результаты диссертационной работы изложены в 10 научных статьях, 2 тезисах докладов на конференциях. Получены патенты Республики Беларусь на изобретение № 9942/С1 от 23.07.2007 г. «Мельница» и № 12959 от 12.07.2009 г. «Мельница».

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения и приложений. Общий объем диссертации 168 с., в их числе 43 иллюстрации на 22 с., 7 приложений на 23 с. и два списка использованных источников, включающие соответственно 136 и 14 наименований на 14 с.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе сделан анализ технологий, в которых широко используются процессы измельчения. Установлено, что во многих производствах качество продукта определяется не тониной помола, а требуемым дисперсным составом. Так, при производстве калийных удобрений флотацион-

ным способом размер самых крупных измельченных частиц сильвинита определяется степенью раскрытия зерен хлористого калия. В то же время содержание фракций (-0,15+0) должно быть минимальным, так как при обесшламливании значительная их часть попадает в отвал. При измельчении прессата в процессе гранулирования КСІ, при переработке фуражного зерна и в других технологиях продукт должен получаться определенной дисперсности при низких энергозатратах. Существующие измельчители не обеспечивают получения продукта узкого дисперсного состава, а энергозатраты при этом весьма высокие. Проведен анализ статей расхода энергии при измельчении. Установлено, что наименьшие энергозатраты достигаются при свободном ударном нагружении материала (без стеснения).

Анализ конструкций агрегатов ударно-центробежного разрушения материалов показывает, что они отличаются низкой энергоемкостью и металлоемкостью, высокой энергонапряженностью, обеспечивают высокую степень измельчения при низком уровне капитальных и эксплуатационных затрат. Однако большой разброс дисперсного состава продуктов измельчения и повышенный абразивный износ рабочих органов сдерживают применение данных конструкций во многих технологиях.

Во второй главе предложен новый способ ударного разрушения, позволяющий получать продукт с узким дисперсным составом. Согласно данному способу измельчение осуществляется при умеренных ударных нагрузках, являющихся оптимальными для данного материала, что значительно уменьшает количество переизмельченных фракций в готовом продукте. Образующиеся крупные фракции подвергаются дополнительному многократному ударному нагружению до получения продукта с необходимым диапазоном размеров частиц. Ударно-центробежная мельница для осуществления данного способа измельчения представлена на рисунке 1.

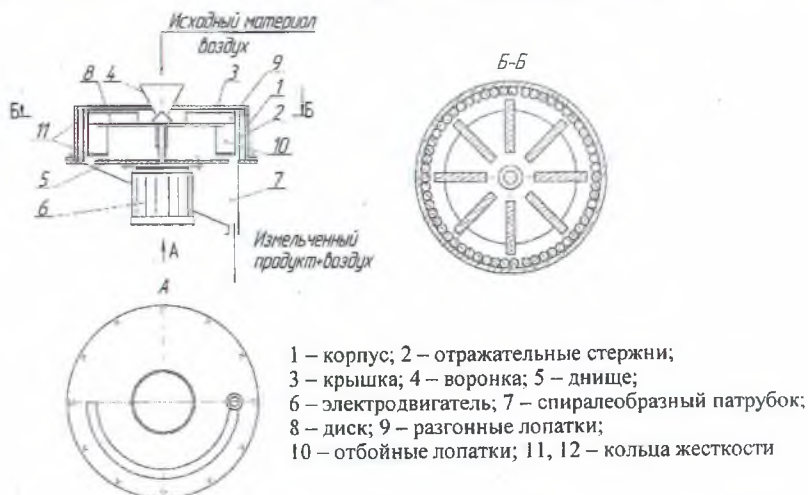
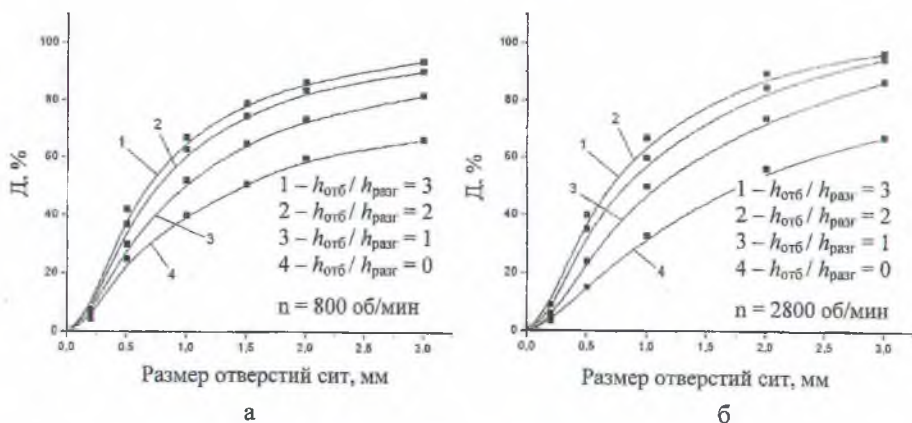


Рисунок 1 – Ударно-центробежная мельница метательного типа

При работе мельницы приводится во вращение ротор и через воронку 4 на диск ротора 8 подается измельчаемый материал. Попадая в каналы между разгонными лопатками 9, материал, двигаясь по ним, за счет центробежной силы разгоняется до высоких скоростей и ударяется об отражательные стержни 2. При ударе происходит разрушение материала с образованием частиц различных размеров. Мелкие частицы разлетаются вдоль отражательной поверхности и за счет силы тяжести и воздействия нисходящего вихревого газового потока опускаются вниз. Более крупные частицы отскакивают от отражательной поверхности и попадают под удар отбойных лопаток 10, где и происходит дополнительное ударное разрушение. В данном измельчителе материал не задерживается в рабочей зоне, измельчение происходит в основном за счет ударов, а наличие отбойных лопаток позволяет крупным частицам подвергать многократному ударному нагружению. Измельченный продукт получается узкого дисперсного состава, а удельный расход электроэнергии на измельчение уменьшается. Опыты показывают, что при подборе оптимального режима вращения ротора можно производить селективное измельчение, при котором менее прочные компоненты исходного материала будут измельчаться сильнее, а компоненты с большей прочностью на выходе из мельницы – иметь более крупные размеры. Для удовлетворения различных требований производства разработано несколько модификаций новой конструкции мельницы.

Определение дисперсного состава продуктов измельчения в зависимости от конструктивных особенностей мельницы, скорости вращения ротора и производительности осуществлялось экспериментальным путем. В ходе исследований определялись потребляемая мельницей мощность и максимальная достижимая производительность. Опыты проводились на полупромышленной мельнице с диаметром ротора по концам лопаток 0,45 м, что позволяло изменять нагрузку по измельчаемому материалу от 0,03 до 1,2 кг/с (100–4200 кг/ч), а скорость вращения ротора – от 400 до 3000 об/мин. Исследования проводились при измельчении силвинитовой руды 1, 2 и 3-го пластов залегания, прессата хлористого калия, извести, мела, гипсового камня, большинства зерновых культур. Обработка опытных данных по дисперсному составу осуществлялась в виде графиков функции распределения материала от размеров ячеек сита.

Экспериментальными исследованиями прежде всего предстояло выяснить влияние наличия отбойных лопаток и их размеров на дисперсный состав продуктов измельчения. Опыты проводились при изменении длины отбойных лопаток от 0 до 105 мм. Высота разгонных лопаток составляла 35 мм. Количество разгонных и отбойных лопаток было одинаковым и составляло 12 шт. На графиках (рисунок 2, а, б) представлены экспериментальные данные по дисперсному составу продуктов измельчения силвинита (а) и зерна ржи (б) при различной высоте отражательных лопаток. Высота отбойных лопаток на графиках представлена как безразмерная величина в виде отношения высоты отбойных к высоте разгонных лопаток:  $\bar{h} = h_{\text{отб}} / h_{\text{разг}}$ .



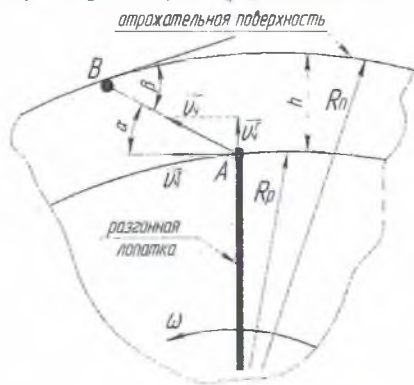
**Рисунок 2 – Влияние высоты отражательных лопаток на дисперсный состав измельченного силвинита (а) и зерна ржи (б)**

Из графических зависимостей видно, что наличие отражательных лопаток оказывает существенное влияние на качество измельчения материалов, так как количество крупных фракций с увеличением высоты лопаток значительно снижается, а продукт получается более однородным. Следует отметить, что качество измельчения сильно возрастает с увеличением высоты отбойных лопаток до  $\bar{h} = 2$ , а далее наблюдается незначительное улучшение качества продукта. Следовательно, применение отбойных лопаток с  $\bar{h} > 2$  нецелесообразно. Из анализа состава продукта измельчения силвинитовой руды при высоте отбойных лопаток  $\bar{h} > 2$  установлено, что фракции размером более 3 мм, количество которых равняется 7–10%, состоят в основном из зерен галопелита или его сростков с другими минералами. Так как прочность галопелита выше, чем кристаллов NaCl и KCl, то значительная его часть остается недоизмельченной. Также анализ муки, полученной при измельчении зерна ржи при  $\bar{h} > 2$ , показывает, что частицы с размером более 2 мм в количестве около 8% состоят из оболочек зерна (отрубей), которые из-за своей эластичности трудно поддаются измельчению. При увеличении высоты отбойных лопаток количество тонкодисперсного продукта (мельче 0,1 мм) во всех опытах практически оставалось постоянным и не превышало 4–6%, что для ряда технологий является весьма важным показателем. Это подтверждает предположения о том, что повторному ударному измельчению с помощью отбойных лопаток подвергаются только крупные фракции.

В дальнейшем проведена серия опытов по определению влияния зазора между отражательными стержнями и концами разгонных лопаток на эффективность измельчения. Уменьшение зазора требует повышения точности изготовления мельницы, а его увеличение должно приводить к ухудшению качества измельчения. Поэтому определение оптимального зазора явля-

ется актуальной задачей. Исследования проводились при измельчении сильвинита с максимальным размером кусков 0,015 м. Первоначальный зазор между концами лопаток и отражательными стержнями равнялся 4 мм, и далее он увеличивался через 4 мм до размера 20 мм. Исследования показали, что с уменьшением зазора качество измельчения несколько улучшается. Так, при скорости вращения ротора 800 об/мин при зазоре 4 мм средний медианный диаметр измельченных частиц был равен 0,7 мм, а при зазоре 20 мм он уже составлял 0,95 мм. Это объясняется тем, что при малых зазорах измельчение происходит не только за счет удара, но и частично за счет истирания, что подтверждается и возрастанием количества энергии, потребляемой приводом мельницы. На основании проведенных исследований зазор между концами лопаток и отражательной поверхностью следует принимать 8–10 мм.

Эффективность ударного измельчения зависит от того, под каким углом куски материала ударяются об отражательную поверхность. Чем ближе угол удара к прямому, тем эффективнее будет протекать процесс измельчения. Теоретическими исследованиями определялись условия, при которых угол удара об отражательные стержни будет близким к прямому. Если лопатки на роторе установлены по радиусу, то частица материала при срыве с лопатки будет иметь радиальную относительную скорость  $v'_r$  и тангенциальную переносную  $v'_t$  (рисунок 3).



**Рисунок 3 – Механизм удара частицы об отражательную стенку**

Вектор полной скорости равен геометрической сумме векторов двух скоростей и будет направлен к точке удара под углом  $\beta$ . Так как величина зазора  $h$  намного меньше  $R_n$ , то принимаем  $\beta \approx \alpha$  и из соотношения  $v'_r$  и  $v'_t$  определим величину угла удара  $\beta$ . Величина переносной скорости  $v'_t$  равна произведению угловой скорости  $\omega$  на радиус ротора.

Величина относительной скорости  $v'_r$  определяется путем решения дифференциального уравнения, описывающего движение одиночной частицы по радиальной лопатке вращающегося ротора.

$$m \cdot \frac{d^2 r}{dt^2} = F_{ц} - F_{тр} \pm R. \quad (1)$$

Подставляя значения центробежной силы  $F_{ц}$ , силы трения  $F_{тр}$  и пренебрегая силой аэродинамического воздействия воздуха  $R$  ввиду ее малости, после преобразования уравнения (1) будем иметь:



$$\frac{d^2 r}{dt^2} = \omega^2 r - 2f\omega \frac{dr}{dt}. \quad (2)$$

Решая данное дифференциальное уравнение второго порядка, определяем скорость  $v_*$ . Согласно схеме (рисунок 3) определяем угол удара  $\beta$ .

$$\beta \approx \alpha \approx \arctg \frac{v_*^r}{v_*^t}. \quad (3)$$

Расчеты по определению угла  $\beta$  показывают, что он не зависит от угловой скорости и радиуса ротора. Величина коэффициента трения  $f$  оказывает незначительное влияние. Расчетами установлено, что угол  $\beta = 33-35^\circ$ .

Для увеличения угла удара  $\beta$  предложено лопатки устанавливать не по радиусу, а с отклонением против хода вращения. В этом случае угол между вектором относительной и окружной скорости будет больше  $90^\circ$ , что ориентирует вектор полной скорости ближе к перпендикулярному.

Согласно схеме (рисунок 4) составлена система уравнений, описывающая движение частицы по наклонной лопатке.

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_n \cos \varphi - F_{\tau}, \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} = F_n \sin \varphi - F_c. \end{cases} \quad (4)$$

Так как частица движется вдоль лопатки, то  $m \frac{d^2 y}{dt^2} = 0$ , и тогда опорная реакция лопатки, согласно второму уравнению системы (4), будет равна:

$$N = 2m\omega \frac{dx}{dt} - m\omega^2 R_n \sin \theta. \quad (5)$$

С учетом (5) уравнение движения частицы вдоль лопатки примет вид

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \omega^2 \sqrt{R_n^2 \cos^2 \theta + x^2 - 2R_n x \cos \theta} - f(2\omega \frac{dx}{dt} - \omega^2 R_n \sin \theta). \quad (6)$$

Решением уравнения (6) численными методами на ЭВМ определялась скорость частицы при сходе с лопатки и далее, в зависимости от угла наклона лопатки  $\gamma$ , вычислялся угол удара  $\beta$ . Результаты расчетов представлены на графике (рисунок 5).

Из графика видно, что с увеличением угла наклона лопатки назад до величины  $12-14^\circ$  угол удара существенно возрастает и достигает  $60^\circ$ . Дальнейшее увеличение угла наклона лопатки нецелесообразно, так как начинает значительно снижаться величина полной скорости частицы.

Для достижения прямого угла удара частицы предлагается, кроме установки лопаток с углом наклона назад на  $12-14^\circ$ , отражательную поверхность стенки формировать из шестигранных стержней. Рабочая поверхность шестигранника, как и кромки лопатки, легко наплавляется износостойкими сплавами. Кроме того, установка лопаток с наклоном назад снижает силу трения частиц о них, а следовательно, уменьшается абразивный износ.

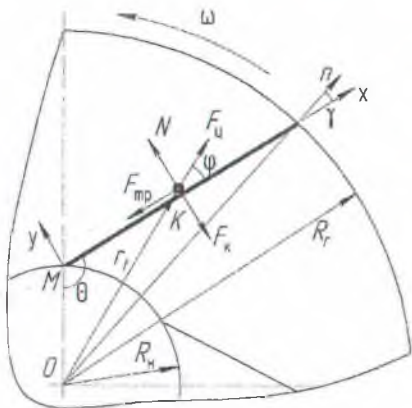


Рисунок 4 – Схема движения частицы по наклонной лопатке

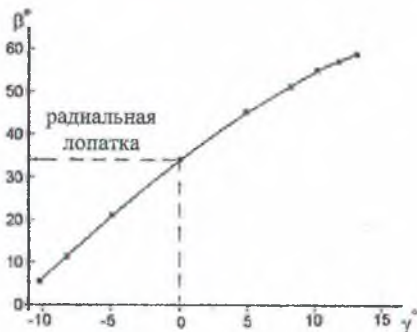
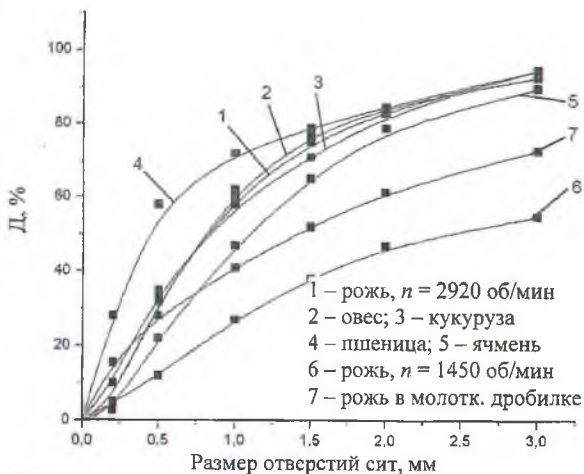


Рисунок 5 – Зависимость угла удара  $\beta$  от угла наклона лопатки  $\gamma$

Проведены сравнительные исследования по определению качества помола в мельнице с отражательными стальными стержнями стенки шестигранной формы и с лопатками, установленными с наклоном назад на  $12^\circ$ . Исследования проводились при измельчении силвинита и зерна ржи. Результаты всех опытов показывают, что для данной модификации мельницы качество измельчения улучшается. Так, ранее, при круглой форме стержней и лопатках, установленных по радиусу, средний медианный диаметр измельченного силвинита был равен  $0,75$  мм, а для новой модификации он составлял около  $0,5$  мм. Аналогичное улучшение наблюдалось и при измельчении ржи.

Проблема качественного измельчения фуражного зерна является весьма актуальной, поэтому были проведены исследования по измельчению пшеницы, ржи, ячменя, овса и кукурузы. Влажность зерна составляла  $13\%$ , а скорость вращения ротора мельницы –  $2920$  об/мин. Результаты этих исследований представлены на рисунке 6 в виде дисперсного состава продуктов измельчения различных зерновых культур.

Из графика видно, что дисперсный состав продуктов измельчения ржи, овса, кукурузы (кривые 1, 2, 3 соответственно) практически одинаковый и основная масса продукта (около  $83\%$ ) имеет размеры  $0,2$ – $2$  мм, что соответствует требованиям, предъявляемым к продукту измельчения фуражного зерна. Количество продукта, имеющего размер менее  $0,2$  мм, не превышает  $4\%$ , а продукт, имеющий размер более  $2$  мм, состоит в основном из оболочек зерновок (отрубей). Более тонкий продукт получается при измельчении зерна пшеницы. Кривая 6 получена при измельчении зерна ржи при скорости вращения ротора  $1450$  об/мин. Здесь качество измельчения низкое, и поэтому при измельчении зерновых культур следует применять высокооборотистые измельчители. Для сравнения на графике кривая 7 показывает дисперсный состав продуктов измельчения зерна ржи в молотковой дробилке при скорости вращения ротора  $2920$  об/мин. Качество измельчения на данном агрегате



**Рисунок 6 – Дисперсный состав продуктов измельчения различных зерновых культур**

сто молотковой при измельчении фуражного зерна.

Дальнейшими теоретическими и экспериментальными исследованиями определялась производительность разработанной конструкции ударно-центробежной мельницы. Производительность мельницы будет определяться пропускной способностью каналов на входе в межлопаточное пространство ротора. В этом сечении ширина каналов минимальная, а скорость кусков материала  $v_k$  еще невысокая. При разработке методики расчета принималось, что материал в мельницу подается из бункера через патрубок, который оканчивается на небольшом расстоянии от загрузочного отверстия мельницы. В мельнице материал вначале попадает на распределительный вращающийся конус, который установлен в центре диска ротора. Если принять, что диаметр основания конуса  $D_1$  и за ним сразу начинаются разгонные лопатки в количестве  $n_d$  штук, имеющие толщину  $b$  и высоту  $h_{разг}$ , то суммарную площадь сечения каналов легко определить.

Принимая скорость материала на входе в каналы  $v_k$  и плотность кусков  $\rho_k$ , определим производительность:

$$G = (1 - \epsilon) \cdot v_k \cdot h_{разг} \cdot \rho_k \cdot (\pi D_1 - n_d b), \text{ кг/с.} \quad (7)$$

Экспериментальные исследования показывают, что даже в узком сечении каналов частицы движутся достаточно свободно и величину порозности следует принимать  $\epsilon = 0,88$ . Скорость частиц на входе в каналы принималась равной радиальной скорости схождения с распределительного конуса. Начальную скорость частицы на конусе принимаем равной скорости истечения из бункера, которая определяется по известной зависимости.

Из-за малости расстояния от патрубка бункера до конуса приращением скорости при падении частицы пренебрегаем. Радиальная скорость схож-

значительно ниже. Проведены дополнительные исследования по измельчению свежесобранной кукурузы высокой влажности. Они показали, что в ударно-центробежной мельнице можно измельчать зерно кукурузы с влажностью до 35% без существенного ухудшения качества продуктов измельчения. Результаты этой серии опытов показывают, что ударно-центробежная мельница может найти широкое применение вме-

дения частиц с вращающегося конуса определялась путем составления и решения системы дифференциальных уравнений движения частицы вдоль образующей, касательной и нормали:

$$\left\{ \begin{aligned} m \left( \frac{d^2 s}{dt^2} - \left( \frac{d\varphi}{dt} \right)^2 s \cdot \sin^2 \alpha \right) &= mg \cos \alpha - Nf \frac{\frac{ds}{dt}}{\sqrt{\left( \frac{ds}{dt} \right)^2 + s^2 \left( \omega - \frac{d\varphi}{dt} \right)^2 \sin^2 \alpha}}, \\ m \left( \frac{d^2 \varphi}{dt^2} s + 2 \frac{d\varphi}{dt} \frac{ds}{dt} \right) \sin \alpha &= Nf \frac{s \left( \omega - \frac{d\varphi}{dt} \right) \sin \alpha}{\sqrt{\left( \frac{ds}{dt} \right)^2 + s^2 \left( \omega - \frac{d\varphi}{dt} \right)^2 \sin^2 \alpha}}, \\ -\frac{1}{2} m \frac{d\varphi}{dt} s \cdot \sin 2\alpha &= N - mg \cos \alpha, \end{aligned} \right. \quad (8)$$

где  $s$  – линейное перемещение частицы вдоль образующей конуса, м;  $\varphi$  – угловое перемещение частицы вдоль касательной к поверхности конуса в данной точке, град;  $\alpha$  – угол при вершине конуса, град.

Решение системы (8) осуществлялось численно при помощи ЭВМ. В качестве начальных условий принимались следующие

$$\left\{ \begin{aligned} s(0) &= R_r / \sin \alpha; \quad \left. \frac{ds}{dt} \right|_{t=0} = v_0 \cos \alpha \\ \varphi(0) &= 0; \quad \left. \frac{d\varphi}{dt} \right|_{t=0} = 0 \end{aligned} \right. \quad (9)$$

Решением системы уравнений (8) определяется скорость частиц на входе в каналы и далее по уравнению (7) рассчитывается производительность мельницы. Экспериментальные исследования подтверждают предложенные зависимости для определения производительности.

Вывод зависимости для расчета мощности привода ударно-центробежной мельницы проводился на основании анализа статей затрат энергии при ее эксплуатации и опытных данных, учитывающих прочностные свойства измельчаемого материала и конструктивные особенности рабочих органов. Полученная зависимость для расчета мощности имеет вид

$$N_{\text{мел}} = \left[ \frac{\frac{QH}{\eta_{\text{вен}}} + f l (Gg + 2G\omega v_{\text{cp}}) + \frac{K_1 K_2 G v_{\text{мел}}^2}{2}}{\eta_{\text{пр}}} \right], \text{ Вт}, \quad (10)$$

где  $\eta_{\text{пр}}$  – КПД привода мельницы.

В данном уравнении первое слагаемое числителя учитывает затраты энергии на работу мельницы как вентилятора:

$$N_{\text{вент}} = \frac{QH}{\eta_{\text{вент}}}, \text{ Вт}, \quad (11)$$

где  $Q$  – производительность по воздуху, м<sup>3</sup>/с;  $H$  – полный напор воздуха, Па;  $\eta_{\text{вент}}$  – КПД мельницы как вентилятора,  $\eta_{\text{вент}} \approx 0,5$ .

Второе слагаемое числителя учитывает потери энергии на трение частиц о поверхность диска и лопаток:

$$N_{\text{тр}} = f l G (g + 2\omega v_{\text{ср}}), \text{ Вт}, \quad (12)$$

где  $f$  – коэффициент трения;  $l$  – длина лопатки, м;  $v_{\text{ср}}$  – средняя скорость куса при движении по лопатке, м/с.

Третье слагаемое числителя в формуле (10) учитывает затраты энергии на разгон кусков материала:

$$N_{\text{раз}} = K_1 K_2 \frac{G v_{\text{пол}}^2}{2}, \text{ Вт}, \quad (13)$$

где  $v_{\text{пол}}$  – полная скорость куса при срыве с лопатки, м/с.

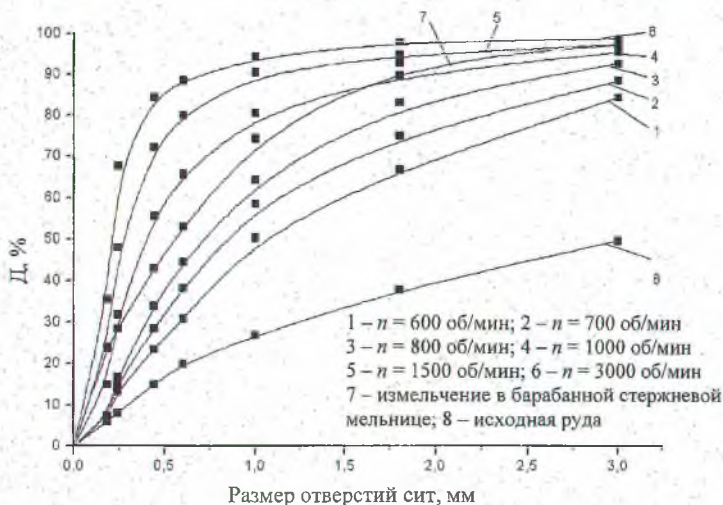
Наличие в мельнице отбойных лопаток позволяет осуществлять многократное ударное нагружение крупных кусков материала, что приводит к дополнительным затратам энергии. Дополнительное ударное нагружение будет зависеть от прочности материала и высоты отбойных лопаток, что в формуле (13) учитывается коэффициентами  $K_1$  и  $K_2$  соответственно. Значение  $K_1$  определяется для исследуемых материалов из таблицы, а  $K_2$  – из графических зависимостей, приведенных в диссертационной работе.

**В третьей главе** приведены результаты исследований ударно-центробежной мельницы применительно к производству калийных удобрений. В данном производстве процессы измельчения широко используются при подготовке калийной руды к обогащению, а также при гранулировании готового продукта.

Калийная руда (сильвинит) состоит из трех компонентов: хлористого калия (23–27%), хлористого натрия (63–72%) и галопелита (5–10% по массе). Перед подачей на обогащение руду необходимо измельчить, чтобы частицы всех компонентов были раскрыты (не имели сростков между собой). В настоящее время при флотационном способе обогащения руду окончательно измельчают в барабанной стержневой мельнице до размера частиц менее 0,8 мм. Недостатками данного измельчающего агрегата являются высокое энергопотребление и переизмельчение значительной части руды (до 25% частиц менее 0,15 мм), что приводит к потере целевого продукта на последующих стадиях производства и тем самым – к снижению степени извлечения КС1 из руды.

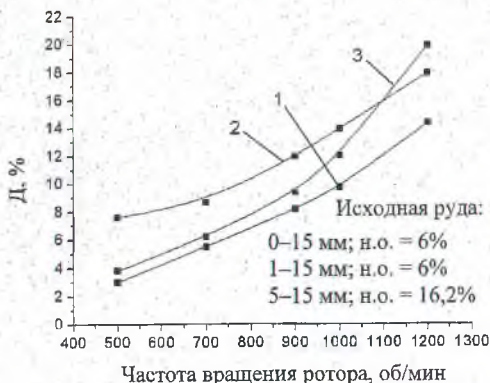
С целью устранения вышеперечисленных недостатков была проведена серия опытов по измельчению сильвинита на новой конструкции мельницы. Исследования проводились на руде, имеющей размеры кусков менее 15 мм, при изменении нагрузки на мельницу по сильвиниту от 500 до 3500 кг/ч. Результаты этих исследований представлены на рисунке 7 в виде графических зависимостей дисперсного состава продукта измельчения при

различной скорости вращения ротора. Кроме того, кривая 7 показывает дисперсный состав сильвинита, измельченного в промышленной барабанной стержневой мельнице, а кривая 8 – дисперсный состав исходного сильвинита.



**Рисунок 7 – Влияние скорости вращения ротора на дисперсный состав продуктов измельчения сильвинитовой руды**

Из графика видно, что измельчать сильвинитовую руду при окружной скорости вращения ротора по концам лопаток более 23,6 м/с ( $n = 1000$  об/мин) нецелесообразно, так как наблюдается ее переизмельчение с образованием значительного количества фракций менее 0,15 мм. Однако из



**Рисунок 8 – Содержание в измельченной сильвинитовой руде фракций менее 0,15 мм в зависимости от числа оборотов ротора мельницы**

рисунка 7 видно, что при скорости вращения ротора до 800 об/мин ( $v_t = 18,84$  м/с) содержание в измельченной руде фракций мельче 0,15 мм в 3–4 раза ниже, чем при измельчении в барабанной стержневой мельнице.

Так как вопрос переизмельчения руды является весьма актуальным, были проведены дополнительные исследования, результаты которых представлены на графике (рисунок 8).

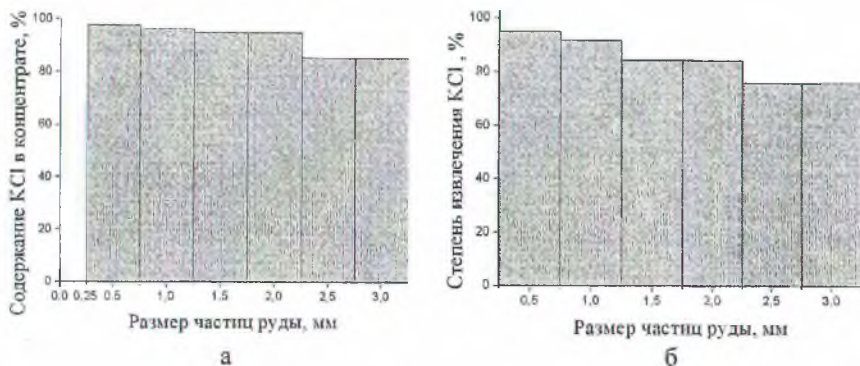
Эти исследования подтверждают, что с увеличением скорости вращения ротора свыше 800 об/мин количество фракций

менее 0,15 мм начинает резко возрастать. Кривая 1 построена на основании опытов, которые проводились на руде, прошедшей через молотковую дробилку. Однако в ходе исследований было установлено, что такая исходная руда уже содержит более 5% частиц с размером менее 0,15 мм, которые образуются при комбайновой добыче и предварительном измельчении в молотковой дробилке. Поэтому следующую серию опытов проводили при предварительном отсеивании из исходной руды всех частиц с размером менее 1 мм. Результаты этих опытов на рисунке 8 представлены кривой 2. Кривая 3 на этом графике построена на основе опытов по измельчению руды первого горизонта залегания с большим содержанием нерастворимого осадка (16,2%). В данном случае руда на измельчение подавалась в виде кусков размером от 5 до 15 мм. Здесь наблюдается более интенсивный рост содержания мелких фракций, что объясняется структурой самой руды.

Таким образом, дополнительные опыты подтвердили, что, применяя для измельчения сильвинитовой руды новую мельницу, можно значительно снизить в продукте измельчения количество мелких фракций и повысить степень извлечения хлористого калия из руды.

Дальнейшими исследованиями изучались полнота раскрытия кристаллов  $KCl$  и наличие сростков их с кристаллами  $NaCl$  и частицами галопелита. На основании визуальных исследований с помощью лупы и микроскопа установлено, что в частицах измельченной руды с размером до 2 мм кристаллы  $KCl$  полностью раскрыты и сростки с другими минералами отсутствуют. В более крупных кусках измельченной руды (2–7 мм) такие сростки в небольшом количестве встречаются. Установлено, что частицы руды размером менее 2 мм имеют форму, близкую к кубической или округленную, что очень важно для последующих стадий переработки руды. Отсутствие сростков в измельченной руде с размером частиц менее 2 мм объясняется тем, что при ударном измельчении разрушение многокомпонентной руды прежде всего идет по поверхностям сростков этих компонентов. Таким образом, при разрушении кусков руды в ударно-центробежной мельнице не нужно ее измельчать до размера  $(-0,8+0)$ . Крупность подаваемой на флотацию руды можно увеличить хотя бы до размера  $(-1,6+0)$ , как это делается в других странах, например, в Канаде. Увеличение крупности зерна перерабатываемого сильвинита приводит к снижению энергопотребления и увеличению производительности на всех стадиях производства, начиная со стадии измельчения и кончая стадией грануляции.

Чтобы подтвердить выводы о полном раскрытии кристаллов хлористого калия при более крупном селективном ударном измельчении руды, были проведены дополнительные исследования по разделению руды в тяжелой жидкости. Известно, что плотность химически чистого хлорида калия составляет  $1,99 \text{ г/см}^3$ , а хлорида натрия —  $2,17 \text{ г/см}^3$ . Необходимая плотность тяжелой жидкости ( $2,09 \text{ г/см}^3$ ) достигалась смешением в определенной пропорции бромформа и толуола в качестве легкого растворителя. По результатам разделения определялось массовое количество всплывшего  $KCl$  для каждой из 4-х фракций, выбранных для анализа, и далее рассчитывалась степень извлечения хлористого калия как отношение массы всплывшего  $KCl$  к его массовому содержанию в исходной руде. Полученные результаты исследований представлены в виде графиков на рисунке 9.

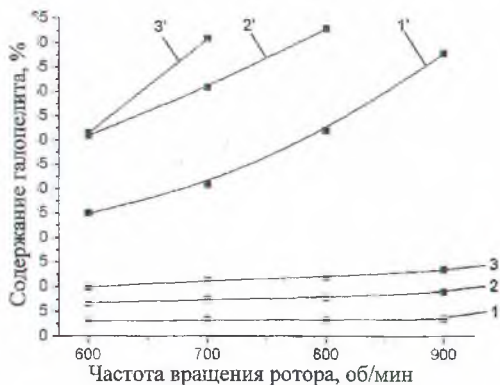


**Рисунок 9 – Содержание KCl в измельченной руде в зависимости от размеров частиц (а); степень извлечения KCl в измельченной руде в зависимости от размеров частиц (б)**

Таким образом, можно сделать вывод, что при ударном измельчении материала в центробежной мельнице руда хорошо раскрывается уже при размере частиц менее 2 мм, вместо 0,8 мм при измельчении в барабанной стержневой мельнице. Это еще раз подтверждает опыт Канады, где руду измельчают трехступенчато в ударно-центробежных мельницах и флотацию ведут при размере частиц до 1,6 мм.

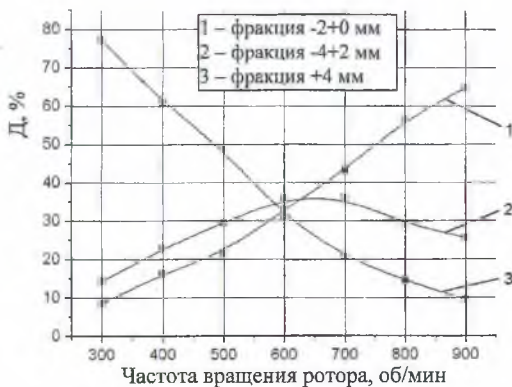
Известно, что в сухой сильвинитовой руде прочность галопелита несколько выше, чем кристаллов NaCl и KCl. Поэтому дальнейшие исследования были направлены на осуществление избирательного измельчения руды с целью сохранения хотя бы некоторой части галопелита в измельченной руде в виде крупных фракций с целью последующего его удаления методом отсева. Исследования по избирательному измельчению проводились на сильвинитовой руде с различных горизонтов залегания, то есть с различным исходным содержанием галопелита. Руда измельчалась при изменении числа оборотов ротора мельницы от 600 до 900 об/мин, продукты измельчения разделялись на 2 класса: менее 2 мм и более 2 мм и анализировались на содержание галопелита в каждой фракции. Результаты этих исследований представлены графически на рисунке 10 в виде зависимостей процентного содержания галопелита в крупной и мелкой фракциях при различном содержании его в исходной руде. Из графика видно, что в продуктах измельчения, имеющих размер менее 2 мм (кривые 1, 2, 3), содержание галопелита на 40–50% ниже, чем в исходном сильвините. С увеличением скорости вращения ротора мельницы наблюдается очень незначительный рост содержания галопелита в мелкой фракции. Что касается крупных фракций (более 2 мм), то в них содержание галопелита во много раз больше, чем в исходном сильвините, и с увеличением числа оборотов ротора мельницы количество галопелита резко возрастает. Резкий рост содержания галопелита с увеличением числа оборотов ротора объясняется более полным измельчением сильвинита, а следовательно, уменьшением количества крупной фракции.





1 – мелкая фракция; 1' – крупная фракция, содержание галопелита в исходном сильвините – 6%  
 2 – мелкая фракция; 2' – крупная фракция, содержание галопелита в исходном сильвините – 10,83%  
 3 – мелкая фракция; 3' – крупная фракция, содержание галопелита в исходном сильвините – 16,2%

**Рисунок 10 – Содержание галопелита в продуктах измельчения сильвинитовой руды при различной скорости вращения ротора мельницы**



**Рисунок 11 – Зависимость фракционного состава прессата KCl от частоты вращения ротора**

36%. При измельчении в молотковой дробилке он равен 16%, а в дробилке НПО «Центр» – 20%. Использование ударно-центробежной мельницы при оптимальной скорости вращения ротора для этих целей позволит достичь большой экономии электроэнергии при прессовании хлористого калия.

Исследованиями по изменению нагрузки по исходному материалу от 0,5 до 3,5 т/ч не выявлено существенных отличий в дисперсном составе продуктов измельчения, что подтверждает возможность работы мельницы при высоких нагрузках.

При проведении всех опытов по измельчению сильвинита осуществлялись замеры потребляемой мощности, которые показали, что удельное энергопотребление (кВтч/т) продукта данной мельницы при скорости вращения ротора 700–800 об/мин в 3–4 раза (в зависимости от скорости вращения ротора) ниже, чем барабанной стержневой, что хорошо согласуется с расчетными данными по предложенной методике.

Проведены исследования по измельчению на ударно-центробежной мельнице прессата (плитки) хлористого калия, получаемого при гранулировании удобрений. Целью измельчения является получение готового продукта в виде частиц размером 2–4 мм. Результаты этих исследований представлены на графике (рисунок 11). Из графика видно, что при скорости вращения ротора 600–700 об/мин выход целевого продукта (–4+2 мм) достигает

**В четвертой главе** диссертации рассмотрены вопросы практической реализации результатов исследований. По результатам исследований были спроектированы, изготовлены и внедрены в производство пять ударно-центробежных мельниц. Так, на РУП «Медпрепараты» мельница внедрена для измельчения растительного и минерального сырья. Малое предприятие «Ваше хозяйство», г. Н. Новгород, использует ударно-центробежную мельницу для измельчения гранул и кристаллов минеральных удобрений с целью приготовления комбинированных смесей удобрений для подкормки различных растений. Две ударно-центробежные мельницы внедрены для измельчения фуражного зерна в СПК «Баличи» Щучинского района. Могилевское ООО «Пик», специализирующееся на производстве рапсового масла, внедрило ударно-центробежную мельницу для разрушения оболочек зерен рапса. Все вышеперечисленные предприятия отмечают высокое качество измельченного продукта и снижение энергопотребления по сравнению с ранее использовавшимися агрегатами на 30%. Совместно с ОАО «Амкодор» проведены успешные производственные испытания мельницы производительностью 7 т/ч при измельчении зерна кукурузы повышенной влажности (до 35%). На основании этих испытаний ОАО «Амкодор» планирует организовать серийное производство мельниц. Наиболее крупный экономический эффект может быть получен при использовании новой мельницы при измельчении силвинита и прессата хлористого калия. Эффект будет достигнут за счет значительного снижения энергозатрат, увеличения степени извлечения KCl из руды, увеличения производительности обогатительных фабрик.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Основные научные результаты диссертации**

1. На основании изучения и анализа технологий и производств с использованием процессов измельчения установлено, что на многих крупнотоннажных предприятиях эффективность процесса измельчения определяется не тониной помола, а узким дисперсным составом получаемого продукта при минимальных энергозатратах [1–А, 5–А, 7–А, 8–А, 11–А].

2. Анализ работ по теории и практике измельчения позволил определить основные статьи энергозатрат на осуществление данного процесса [1–А, 2–А]. Установлено, что минимальные энергозатраты достигаются при ударном разрушении материалов. Теоретические исследования по ударному разрушению показывают сложность физических явлений, протекающих при осуществлении данного процесса, которые еще больше усложняются из-за неоднородности строения материалов, подвергаемых разрушению. При изучении эффективности процесса измельчения в известных конструкциях ударных измельчителей установлено, что они не обеспечивают получения продукта узкого дисперсного состава и большинство из них имеют высокое энергопотребление.

3. На основании анализа работ по ударному измельчению предложен способ ударного измельчения и конструкция ударно-центробежной мельницы для его осуществления [8-А, 13-А, 14-А], обеспечивающая получение измельченного продукта узкого дисперсного состава при более низких энергозатратах. Теоретическими и экспериментальными исследованиями доказано, что узкий дисперсный состав продуктов измельчения в новой конструкции мельницы достигается за счет установки в нижней части ротора отражательных лопаток и оптимального профиля отражательной поверхности мельницы [3-А, 5-А].

4. Экспериментальными исследованиями по измельчению многих материалов, имеющих различные физико-механические свойства, определены оптимальные режимы для получения продукта требуемого качества [7-А, 10-А]. Установлена возможность качественного измельчения растительного сырья с высокой (до 35%) влажностью. На основании теоретических и экспериментальных исследований получены математические зависимости для расчета потребляемой мощности и производительности ударно-центробежной мельницы новой конструкции [1-А, 2-А, 9-А].

5. Экспериментальные исследования по измельчению сильвинитовой руды позволили определить оптимальные условия, при которых достигается [6-А, 12-А]:

а) полное раскрытие зерен хлористого калия при размерах измельченной руды (-2+0 мм) вместо (-0,8+0 мм) на барабанных стержневых мельницах, применяемых в производстве в настоящее время;

б) снижение переизмельчения руды и содержания мелких фракций в готовом продукте не менее чем в 2 раза;

в) снижение удельного энергопотребления в 3-4 раза;

г) возможность осуществления в новой мельнице селективного измельчения сильвинитовой руды, что позволяет на 40% снизить содержание галопелита в измельченном продукте, поступающем на флотацию.

6. Исследования по измельчению прессата хлористого калия, получаемого при его гранулировании, показали возможность выхода целевого продукта с размером частиц 2-4 мм в 2 раза больше, чем в существующей мельнице [4-А].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

На основании проведенных исследований, при непосредственном участии автора, разработано 5 проектов ударно-центробежных мельниц, изготовлены промышленные образцы, успешно проведены их промышленные испытания и осуществлено их внедрение для измельчения растительного и минерального сырья (РУП «Медпрепарат»), измельчения гранул и кристаллов минеральных удобрений для приготовления комбинированных смесей (ООО «Ваше хозяйство»), измельчения зерна на фуражные цели и перемешивания зерна кукурузы перед его консервированием (СПК «Баличи»), измельчения зерна рапса при извлечении из него масла (ООО «Пик»). При всех внедрениях отмечается высокая эффективность ударно-центробежных

мельниц разработанных конструкций, заключающаяся в получении измельченного продукта узкого дисперсного состава требуемой крупности при снижении энергозатрат на 30% по сравнению с другими конструкциями, применяемыми для этих целей.

Так как потребность в ударно-центробежных мельницах новых конструкций для измельчения фуражного зерна, кукурузы, рапса непрерывно возрастает, то в ближайшие годы ожидается более широкое их внедрение в производство.

Внедрение ударно-центробежных мельниц при измельчении сильвинитовой руды, а также прессата хлористого калия позволит увеличить производительность флотационных фабрик, увеличить степень извлечения целевого продукта из руды, значительно снизить энергопотребление производства.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Статьи*

1–А. Левданский, Э.И. Ударное измельчение материалов и некоторые направления его дальнейшего совершенствования / Э.И. Левданский, А.Э. Левданский, П.С. Гребенчук // Химическая промышленность. – 2005. – Т. 82, № 12. – С. 617–626.

2–А. Левданский, Э.И. Проблемы измельчения материалов ударом и некоторые пути их решения / Э.И. Левданский, А.Э. Левданский, П.С. Гребенчук // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорган. в-в. – 2005. – Вып. XIII. – С. 154–158.

3–А. Левданский, Э.И. Влияние конструктивных и технологических параметров роторно-центробежной мельницы на эффективность измельчения материалов / Э.И. Левданский, А.Э. Левданский, П.С. Гребенчук // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорган. в-в. – 2006. – Вып. XIV. – С. 129–132.

4–А. Левданский, Э.И. Исследования по измельчению прессата хлористого калия на ударно-центробежной мельнице / Э.И. Левданский, А.Э. Левданский, П.С. Гребенчук // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорган. в-в. – 2007. – Вып. XV. – С. 97–99.

5–А. Левданский, Э.И. Совершенствование процесса измельчения сильвинитовой руды перед флотацией / Э.И. Левданский, А.Э. Левданский, П.С. Гребенчук // Обогащение руд. – 2007. – № 3. – С. 3–7.

6–А. Левданский, Э.И. Некоторые пути совершенствования технологии производства калийных удобрений / Э.И. Левданский, А.Э. Левданский, П.С. Гребенчук // Весці НАН Беларусі. Сер. хім. навук. – 2007. – № 4. – С. 99–105.

7–А. Левданский, Э.И. Некоторые пути совершенствования процесса

измельчения в мельницах ударно-метательного типа / Э.И. Левданский, А.Э. Левданский, П.С. Гребенчук // Строительная наука и техника. – 2008. – № 2. – С. 99–102.

8–А. Левданский, Э.И. Некоторые пути совершенствования измельчителей ударного действия / Э.И. Левданский, А.Э. Левданский, П.С. Гребенчук // Инженер-механик. – 2010. – Вып. I. – С. 17–21.

9–А. Гребенчук, П.С. Исследования по определению производительности ударно-центробежной мельницы / П.С. Гребенчук // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорганич. в-в. – 2010. – Вып. XVIII. – С. 183–186.

10–А. Левданский, Э.И. Разработка и исследование высокоэффективной конструкции измельчителя фуражного зерна / Э.И. Левданский, П.С. Гребенчук, А.Э. Левданский // Агропанорама. – 2010. – № 4. – С. 10–15.

### *Материалы конференций*

11–А. Пути совершенствования ударно-центробежных измельчителей метательного типа / Э.И. Левданский, А.Э. Левданский, П.С. Гребенчук, Д.И. Чиркун // Наука и технология строительных материалов: состояние и перспективы развития: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 22–24 апр. 2005 г. / Белорус. гос. технол. ун-т; редкол.: И.М. Жарский [и др.]. – Минск, 2005. – С. 174–177.

12–А. Левданский, Э.И. Энергосберегающая технология переработки силвинитовой руды / Э.И. Левданский, А.Э. Левданский, П.С. Гребенчук // Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 11–13 нояб. 2005 г. / Белорус. гос. технол. ун-т; редкол.: И.М. Жарский [и др.]. – Минск, 2005. – С. 77–80.

### *Патенты на изобретение*

13–А. Мельница: пат. 9942 Респ. Беларусь, МПК6 В 02С 13/00 / Э.И. Левданский, А.Э. Левданский, П.С. Гребенчук, С.Э. Левданский (РБ). – № а 20050439; заявл. 05.05.05; опубл. 28.02.07 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 2. – С. 74.

11–А. Мельница: пат. 1 2959 Респ. Беларусь, МПК6 В 02С 13/00 / Э.И. Левданский, А.Э. Левданский, П.С. Гребенчук, С.Э. Левданский (РБ). – № а 20071198; заявл. 10.02.07; опубл. 12.07.09 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 7. – С. 56.



Грэбянчук Павел Сяргеевіч

### Селектыўнае здрабненне матэрыялаў ў цэнтрабеглым млыне шматразовага ўдарнага нагружэння

Ключавыя словы: млын, здрабненне, удар, хуткасць, прывад, ротар, лапаткі, матэрыял, энергаспажыванне, эфектыўнасць, магутнасць, прадукцыйнасць, выпрабаванні, укараненні.

Аб'ект даследаванняў – працэс здрабнення ва ўдарна-цэнтрабеглым млыне раскідвальнага тыпу.

Мэта дысертацыйнай работы – удасканаленне працэсу ўдарнай дэзінтэграцыі і агрэгатаў для яго здзяйснення з мэтай атрымання прадуктаў памолу вузкай дысперснасці пры нізкім энергаспажыванні.

У дадзенай рабоце прааналізаваны вынікі тэарэтычных і эксперыментальных даследаванняў працэсу ўдарнага здрабнення матэрыялаў, выяўлены асноўныя прычыны нераўнамернасці дысперснага складу матэрыялу ў прамысловых агрэгатах ударнага здрабнення, а таксама магчымыя шляхі павышэння іх эфектыўнасці і зніжэння энергаёмкасці. На падставе праведзенага аналізу прапанаваны новы спосаб выбіральной ударнай дэзінтэграцыі і канструкцыя ўдарна-цэнтрабеглага млына для яго здзяйснення, у якой недаздробненыя кавалкі матэрыялу падвяргаюцца шматразоваму нагружэнню, што дазваляе дасягнуць больш раўнамернага дысперснага складу гатовага прадукту. Тэарэтычнымі і эксперыментальнымі даследаваннямі па вывучэнні руху кавалкаў матэрыялу, які здрабняецца, у рабочай зоне млына вызначаны аптымальныя канструкцыйныя і тэхналагічныя параметры здрабняльніка, атрыманы матэматычныя залежнасці для разліку магутнасці і вызначэння прадукцыйнасці ўдарна-цэнтрабеглага млына новай канструкцыі. Эксперыментальныя даследаванні па выбіральным здрабненні сільвінітавай руды паказалі мэтазгоднасць выкарыстання ўдарна-цэнтрабеглага млына новай канструкцыі пры падрыхтоўцы калійнай руды да флатацыі.

На падставе вывадаў тэарэтычнай і эксперыментальнай частак работы спраектавана і выраблена некалькі ўзораў ударна-цэнтрабеглых млыноў рознай прадукцыйнасці, якія былі паспяхова ўкаранены на пяці прадпрыемствах рэспублікі і блізкага замежжа для здрабнення расліннай і мінеральнай сыравіны.

Галіна выкарыстання вынікаў дысертацыі – хімічная прамысловасць, вытворчасць будаўнічых матэрыялаў, лёгкая прамысловасць, сельская гаспадарка.

## РЕЗЮМЕ

Гребенчук Павел Сергеевич

### Селективное измельчение материалов в центробежной мельнице многократного ударного нагружения

Ключевые слова: мельница, измельчение, удар, скорость, привод, ротор, лопатки, материал, энергопотребление, эффективность, мощность, производительность, испытания, внедрения.

Объект исследований – процесс измельчения в ударно-центробежной мельнице метательного типа.

Цель диссертационной работы – совершенствование процесса ударной дезинтеграции и агрегатов для его осуществления с целью получения продуктов помола узкой дисперсности при низком энергопотреблении.

В настоящей работе проанализированы результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса ударного измельчения материалов, установлены основные причины неравномерности дисперсного состава измельченного материала в промышленных агрегатах ударного измельчения, а также возможные способы повышения их эффективности и снижения энергоемкости. На основании проведенного анализа предложены новый способ избирательной ударной дезинтеграции и конструкция ударно-центробежной мельницы для его осуществления, в которой недоизмельченные куски материала подвергаются многократному нагружению, что позволяет добиться более равномерного дисперсного состава готового продукта. Теоретическими и экспериментальными исследованиями по изучению движения кусков измельчаемого материала в рабочей зоне мельницы определены оптимальные конструктивные и технологические параметры измельчителя, получены математические зависимости для расчета потребляемой мощности и определения производительности ударно-центробежной мельницы новой конструкции. Экспериментальные исследования по избирательному измельчению силвинитовой руды показали целесообразность использования ударно-центробежной мельницы новой конструкции при подготовке калийной руды к флотации.

На основании выводов теоретической и экспериментальной частей работы спроектировано и изготовлено несколько образцов ударно-центробежных мельниц различной производительности, которые были успешно внедрены на пяти предприятиях республики и ближнего зарубежья для измельчения растительного и минерального сырья.

Область применения результатов диссертации – химическая промышленность, производство строительных материалов, легкая промышленность, сельское хозяйство.

## SUMMARY

Hrebianchuk Pavel Sergeevich

### **Electoral grinding of materials in a repeated strike loading centrifugal mill**

Key words: mills, crushing, strike, speed, drive, rotor, blades, material, power consumption, efficiency, power, productivity, tests, introductions.

Object of research – process of grinding in a strike-centrifugal mill of missile type.

The purpose of dissertational work – perfection of the process of a strike decomposition and aggregates, used for it for the purpose of receiving products of grinding with particular dispersity under low power consumption.

The results of theoretical and experimental researches of a materials strike grinding process are analysed in the present work. Basic causes of an irregularity of dispersed structure of grinded material in industrial aggregates of strike grinding as well as some possible ways of its efficiency rising and power intensity reduction are established. On the basis of this analysis the new method of election strike decomposition and a new construction of a strike-centrifugal mill are offered. In this construction the underground pieces of material are exposed by repeated loading, and it allows to obtain more equal dispersed structure of finished product. Theoretical and experimental researches of a grinded materials movement in a mill's working area allows to determine optimum construction and technological operation factors of grinder, and to obtain mathematical dependences for power consumption calculation and for the productivity of the new construction of a strike-centrifugal mill determination. Experimental researches of the electoral grinding of a sylvinite ore showed the expediency of the new construction of strike-centrifugal mill using for preparing of a potassium ore to flotation.

On the basis of the theoretical and experimental parts of the given work some samples of strike-centrifugal mills of different productivity were projected and manufactured. These samples were successfully introduced at five enterprises of the republic and the former Soviet republics for vegetative and mineral raw materials grinding.

The area of the dissertation results application – chemical industry, building materials production, light and food industry.



Научное издание

**Гребенчук Павел Сергеевич**

**СЕЛЕКТИВНОЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ  
В ЦЕНТРОБЕЖНОЙ МЕЛЬНИЦЕ МНОГОКРАТНОГО  
УДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

по специальности 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

Ответственный за выпуск П.С. Гребенчук

Подписано в печать 25.10.2011. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,5. Уч.-изд. л. 1,5.

Тираж 60 экз. Заказ **434**.

Издатель и полиграфическое исполнение:

УО «Белорусский государственный технологический университет».

ЛИ № 02330/0549423 от 08.04.2009.

ЛП № 02330/0150477 от 16.01.2009.

Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.