

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 621.926

ТАБОЛИЧ
Андрей Викторович

**ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ ВЫСОКОАБРАЗИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ
В ЦЕНТРОБЕЖНО-УДАРНЫХ МЕЛЬНИЦАХ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (нефтехимические
и химические производства)

Минск 2019

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет»

Научный руководитель: **Вайтехович Петр Евгеньевич**,
доктор технических наук, доцент кафедры машин и аппаратов химических и силикатных производств учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»

Официальные оппоненты: **Сиваченко Леонид Александрович**,
доктор технических наук, профессор кафедры «Транспортные и технологические машины» ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет»;
Вилькоцкий Андрей Иванович,
кандидат технических наук, доцент кафедры процессов и аппаратов химических производств учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»

Оппонирующая организация: ОАО «Белгорхимпром»

Защита состоится 17 июня 2019 г. в 15⁰⁰ часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.08.02 при учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет» по адресу: 220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, ауд. 240, корп. 4.

Тел. (017) 327-56-20; факс (017) 327-56-20, e-mail: dyadenko-mihail@mail.ru.

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

Автореферат разослан «15» мая 2019 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
кандидат технических наук, доцент


М.В. Дяденко

ВВЕДЕНИЕ

Процессы измельчения применяются практически в любой отрасли производственной деятельности. Измельчение материалов связано с большими энергозатратами и абразивным износом рабочих органов машин. При этом процесс разрушения материалов во время измельчения довольно сложен и не до конца изучен. Агрегаты ударного действия в большинстве случаев используются для измельчения малоабразивных материалов средней прочности, а так же волокнистых материалов органического происхождения и обладают рядом преимуществ по качеству готового продукта и по эксплуатационным характеристикам самих агрегатов. В связи с этим, научные изыскания, направленные на разработку, исследование и внедрение в производство измельчителей ударного принципа действия, являются весьма актуальными. Особенно это важно для разработки новых конструкций центробежно-ударных мельниц, которые могли бы применяться для измельчения высокопрочных абразивных материалов, таких как электрокорунд и кварцевый стекольный песок, и при этом решать актуальную задачу снижения энергозатрат на процесс измельчения.

Таким образом, целью данной работы является поиск и научное обоснование новых технических решений по повышению энергоэффективности процесса помола, дисперсности конечного продукта и снижению абразивного износа в измельчителях центробежно-ударного принципа действия.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами. Данная работа выполнялась в рамках госбюджетных тем: задание 1.44 «Развитие методологии создания и применения многофункциональных технологических комплексов для послойного раскроя и измельчения, сборки и синтеза изделий из композиционных материалов» (ОАО «НПО Центр», ГПНИ «Механика, техническая диагностика, металлургия», № гос. регистрации 20140604, 2014–2016 гг.); задание 1.45 «Проектирование и применение технологических комплексов аддитивного производства крупногабаритных изделий из неметаллических материалов, включающих оборудование для 3D- печати, подготовки расходных и связующих материалов и последующей обработки синтезируемых изделий» (ОАО «НПО Центр», ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении», № гос. регистрации 20162948, 2016–2018 гг.).

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является поиск и научное обоснование новых технических решений по повышению энергоэффективности процесса помола, дисперсности конечного продукта и

снижению абразивного износа в измельчителях центробежно-ударного принципа действия.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать метод расчета траектории движения частиц измельчаемого материала в межлопаточном пространстве ускорителя центробежно-ударной мельницы.

2. Разработать метод расчета скорости и угла вылета частиц из ускорителя центробежно-ударной мельницы при различных конструктивных параметрах его разгонных лопаток.

3. Определить оптимальные конструктивные параметры камеры измельчения центробежно-ударной мельницы для обеспечения максимальной эффективности помола.

4. Установить закономерности изменения износа основных рабочих элементов центробежно-ударной мельницы в зависимости от конструктивных параметров ускорителя и отбойной поверхности камеры измельчения. Определить наиболее износостойкие элементы конструкции и эффективность применения различных конструктивных материалов, работающих в условиях сложных ударно-истирающих воздействий, при реализации принципа свободного удара в центробежно-ударных мельницах.

Объектом исследования является центробежно-ударная мельница.

Предмет исследования – процесс измельчения, осуществляемый в центробежно-ударной мельнице.

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке методики расчета траектории движения материала с учетом взаимодействия частиц в межлопаточном пространстве ускорителя и на выходе из него, установлении закономерностей изменения энергоэффективности процесса измельчения и абразивного износа элементов конструкции центробежно-ударной мельницы, которые позволяют для различных видов измельчаемых материалов при требуемой дисперсности продукта выбрать оптимальную конструкцию ускорителя, форму, расположение и конструкционный материал элементов отбойной поверхности.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод определения скорости и траектории движения частиц измельчаемого материала в межлопаточном пространстве различных конструкций ускорителей, позволяющий установить значения скорости и угла контакта частиц в месте соприкосновения с лопастью, при движении вдоль нее и на выходе из ускорителя.

2. Математическое описание и методика расчета скорости движения измельчаемого материала с учетом взаимодействия частиц, основанные на реше-

нии уравнений механики сыпучей среды, подтвердившие возможность использования для инженерных расчетов методов анализа движения отдельных частиц и позволяющие спрогнозировать величину эффективности измельчения и абразивного износа в зависимости от конструктивных параметров ускорителя.

3. Результаты экспериментальных исследований по определению влияния конструктивных параметров ускорителя ударно-центробежной мельницы на энергоэффективность процесса измельчения, дающие возможность минимизировать ее значение в зависимости от требуемой дисперсности конечного продукта.

4. Закономерности изменения абразивного износа в зависимости от геометрических параметров ускорителя, позволяющие в совокупности с величиной энергоэффективности выбрать оптимальное конструктивное исполнение ускорителя, угол установки элементов отбойной поверхности и конструкционный материал быстроизнашивающихся поверхностей.

Личный вклад соискателя ученой степени. Все результаты и положения, выносимые на защиту, получены автором лично. Соискателем проведен анализ различных способов измельчения материалов и определены преимущества и сферы эффективного применения центробежно-ударного помола. Совместно с научным руководителем принимал непосредственное участие в постановке задач, разработке методик и проведении теоретических и экспериментальных исследований. Для проведения экспериментальных исследований им были разработаны различные конструкции ускорителей и отбойных поверхностей камеры измельчения экспериментальной ударно-центробежной мельницы, на которой проводились исследования с целью повышения энергоэффективности процесса и износостойкости конструктивных элементов. Полученные результаты позволили определить оптимальные конструктивные параметры ударно-центробежных мельниц, предложить конструкции, обеспечивающие снижение удельных энергозатрат на помол, при неизменных массогабаритных характеристиках увеличить производительность, достичь большей износостойкости, повысить тонину помола.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов. Результаты исследований докладывались на следующих конференциях: 3-й международной научно-технической конференции «Центробежная техника – высокие технологии» (Минск, 2008 г.); международной научно-технической конференции «Новые технологии рециклинга отходов производства и потребления» (Минск, 2011 г.); 4-й международной научно-технической конференции «Переработка минерального сырья. Инновационные технологии и оборудование» (Минск, 2012 г.); 2-м республиканском отраслевом форуме «Промышленность строительных материалов Республики Беларусь: конкурентоспособность, эффективное управление, инновации» (Минск, 2014 г.); 8-й международной

научно-практической конференции «Опыт производства и применения ячеистого бетона автоклавного твердения» (Минск, Могилев, 2014 г.); Международной научно-практической конференции «Наука, техника и инновационные технологии в эпоху могущества и счастья» (Туркменистан, 2014 г.); 78-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов БГТУ (Минск, 2014 г.); 5-й международной научно-технической конференции «Переработка минерального сырья. Инновационные технологии и оборудование» (Минск, 2014 г.); 79-й научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов БГТУ (Минск, 2015 г.); семинаре «Проблемы, механизмы и перспективные области коммерциализации результатов научных исследований в странах Евразийского экономического союза» (Минск, 2015 г.); 4-м форуме производителей и поставщиков строительных материалов (Минск, 2015 г.); 6-й международной научно-технической конференции «Переработка минерального сырья. Инновационные технологии и оборудование» (Минск, 2016 г.); 25-м международном научном симпозиуме «Неделя горняка-2017» (Москва, 2017 г.).

Проведены опытно-промышленные испытания на ОАО «РУСАЛ-Бокситогорск», ЗАО «Урал-Омега», ОАО «Полоцк-Стекловолокно», Филиал «Гомельский ГОК» ОАО «Гомельстекло».

Опубликование результатов диссертации. Основные результаты диссертационной работы изложены в 6 статьях в научных журналах, включенных в перечень ВАК Республики Беларусь, в материалах 15 конференций, 2 тезисах докладов. Новизна технических решений подтверждена патентами Российской Федерации (№ 179319, №2554976, № 138154) и патентами Республики Беларусь (№ 20755, № 10041).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из перечня условных обозначений (3 с.), введения (2 с.), общей характеристики работы (4 с.), четырех глав (112 с.), заключения (3 с.), библиографического списка, содержащего 149 использованных источников (13 с.), 28 собственных работ соискателя (5 с.) и приложений (3 с.). Результаты исследований изложены на 108 с. машинописного текста и представлены на 59 иллюстрациях (53 с.) и в 12 таблицах (10 с.)

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе определены основные качественные характеристики процесса измельчения: эффективность, энергоэффективность и абразивный износ. Дано определение их физической сущности, размерности, указан диапазон изменения. Приведена общая классификация мельниц и мельниц ударного принципа действия в частности. Высокая энергоэффективность, простота конструкции и регулировки, большие возможности по защите конструкции от износа за счет использования принципа самофутеровки, а также их широкое применение в промышленности предопределили выбор центробежно-ударных мельниц (рисунок 1) в качестве объекта исследования.



Рисунок 1. – Центробежно-ударная мельница

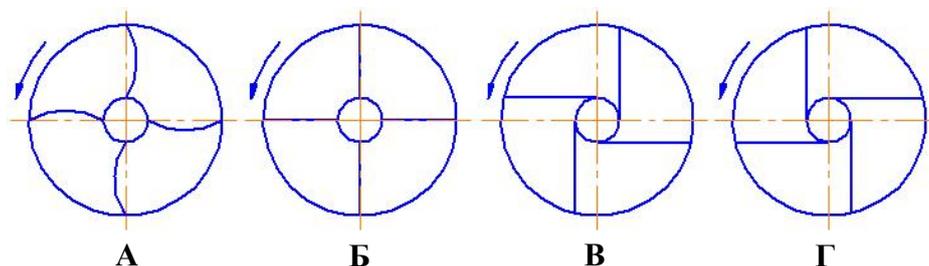
Сделан анализ научных работ по исследованию конструкции центробежно-ударных измельчителей и перспектив их применения в различных процессах. Большинство исследований направлены на повышение эффективности процесса помола без должного учета износа элементов конструкции, который зачастую делает неприменимыми некоторые технические решения. Отмечена необходимость изучения энергоэффективности процесса измельчения наряду с одновременным анализом процесса абразивного износа основных элементов конструкции. Установлено, что большинство работ посвящено исследованиям центробежно-ударного помола с получением материалов с размером частиц более 100 мкм. Однако, как показывает практика, до 90% центробежно-ударных мельниц работают с получением материалов с размером частиц менее 100 мкм, что указывает на необходимость разработки новых энергоэффективных конструкций для их получения. Определено несколько направлений рационального использования ударно-центробежных мельниц. Среди них основными являются измельчение компонентов строительных материалов и различных руд.

Проведен анализ направлений совершенствования центробежно-ударных мельниц с точки зрения повышения их энергоэффективности и износостойкости. Установлено, что наибольшее влияние на эти характеристики оказывают конструктивные особенности ускорителя и отбойной поверхности, изменение которых с одной стороны дает возможность оптимизировать физические параметры процесса (скорость и угол удара измельчаемых частиц об отбойную по-

верхность), а с другой может минимизировать негативные влияния транспортного и циркуляционного воздушных потоков, отклоняющих частицы материала от оптимальной траектории.

В целом можно отметить значительный объем практических и теоретических исследований процесса ударного измельчения и центробежно-ударного в частности. Однако единой теории, объединяющей между собой вопросы энергоэффективности процесса помола, износа основных элементов конструкции, грансостава получаемых материалов с конструктивными и технологическими параметрами центробежно-ударных мельниц, до сих пор нет. Поэтому в настоящее время возникла необходимость проведения серии исследований в идентичных условиях в совокупности с современными методами математического моделирования и расчета, в ходе которых определялись бы и исследовались основные технические характеристики конструкции измельчителя и технологические процессы центробежно-ударного измельчения материалов.

Вторая глава посвящена теоретическому исследованию движения материала в камере измельчения ударно-центробежной мельницы. Теоретический анализ проводился на открытых типах ускорителей (без боковой обечайки) с разными схемами установки лопастей (рисунок 2).



А – ускоритель с лопастями в виде логарифмической кривой; **Б** – ускоритель с радиальными лопастями; **В** – ускоритель с лопастями, установленными тангенциально по направлению вращения ускорителя; **Г** – ускоритель с лопастями, установленными тангенциально против направления вращения ускорителя

Рисунок 2. – Типы исследуемых ускорителей

На начальном этапе изучалось движение одиночной частицы. Причем был использован метод позонного анализа их перемещения: в центральной зоне ускорителя, где происходит распределение материала, в межлопаственном пространстве и при непосредственном контакте с лопастью во время скольжения по ней. Отличительная особенность измельчителей ОАО «НПО Центр» заключается в том, что материал попадает на конус, падая с определенной высоты. Для расчета параметров движения по конусу использованы уравнения, составленные в системе координат, оси которой направлены вдоль образующей конуса, нормально и тангенциально к ней. Расчеты показали, что движение ча-

стиц по нормали к боковой поверхности конуса и по тангенциальному направлению можно не учитывать. Они движутся в основном в одной плоскости вдоль образующей. При этом радиальная составляющая этой скорости и будет начальной для анализа движения в межлопастном пространстве. В рабочем интервале вращения ускорителя (3000–4500 об/мин) и угле при вершине конуса-распределителя $\alpha=45^\circ$ начальная скорость изменялась в диапазоне 2,5–4,0 м/с.

Далее рассчитывалась траектория движения частиц между лопастями от границ зоны распределения (начальный радиус установки лопастей) до соприкосновения с ними. Задача решалась с использованием уравнения относительного движения частиц по поверхности вращающегося диска. Так как высота ротора значительно меньше его диаметра, движение рассматривалось в одной плоскости. Составлены уравнения относительного движения частиц по поверхности вращающегося диска в проекциях на оси r и ϕ в полярной системы координат. После выражения тригонометрических функций через проекции скорости получены расчетные уравнения движения частицы в межлопастном пространстве ускорителя:

$$\begin{cases} \ddot{r} - r(\dot{\phi})^2 = -fg \frac{\dot{r}}{\sqrt{(\dot{r})^2 + (r\dot{\phi})^2}} - 2\omega r\dot{\phi} + \omega^2 r, \\ r\ddot{\phi} + 2\dot{r}\dot{\phi} = -fg \frac{r\dot{\phi}}{\sqrt{(\dot{r})^2 + (r\dot{\phi})^2}} + 2\omega\dot{r}. \end{cases} \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²; f – коэффициент трения частицы по ускорителю; ω – угловая скорость ускорителя, рад/с.

Расчет проводился для ускорителей с прямыми лопатками (рисунок 2, Б, В, Г) диаметром 460 мм. Начальный радиус принимался равным радиусу конуса распределителя $r_0=80$ мм. Анализировалось движение частиц при начальном угле расположения относительно лопасти $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ (рисунок 3). Диапазон частот вращения ускорителя n составляет 1500 – 4500 об/мин (157–471 рад/с). Условием окончания расчета являлось соприкосновение частиц с лопастями, описанными со-

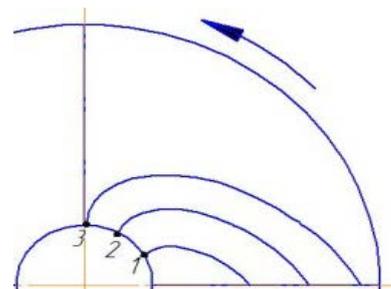


Рисунок 3. – Траектория движения частиц в ускорителе

ответствующими уравнениями. Для радиальных лопастей ускорителя «Б» (рисунок 2) это $\phi=0$, для лопастей ускорителя «В» – $r=r_0\cos\phi$, для лопастей ускорителя «Г» – $r=r_0\sin\phi$. Выполнение расчета по уравнениям (1) дало возможность определить радиус и скорость во время контакта частицы с лопастью. Расстояние от центра ускорителя, на котором частицы контактируют с лопастью (рисунок 4), практически не зависит от угловой скорости, но существенно увеличивается при отдалении от лопасти в начальный момент. При длине лопасти 230 мм максимально удаленные частицы контактируют с ней на расстоянии

172 мм. При этом конструктивное исполнение ускорителя с разными вариантами установки лопастей практически не влияет на скорость контакта. Разница в ее величине не превышает 1,5 м/с.

По сравнению с остальными, значительно отличается схема с лопастями, установленными тангенциально против направления вращения ускорителя (рисунок 2, Г). Здесь с периферийными участками лопасти контактируют частицы, находящиеся в начальный момент вблизи внутренних концов лопастей (рисунок 3, положение 1). Причем этот контакт происходит при угловой скорости ускорителя менее 235 рад/с. При увеличении начального смещения частицы свободно движутся по нижнему диску ускорителя, не контактируя с лопастями, и хаотично вылетают из него под различными углами.

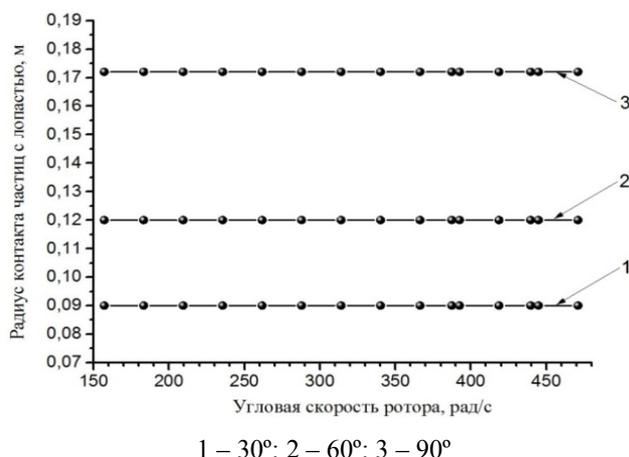


Рисунок 4. – Зависимость относительной скорости частицы при столкновении с лопастью от угловой скорости ускорителя для различных начальных положений частицы относительно лопасти

Далее расчет проводился при движении частиц по лопасти ускорителя (рисунок 5). Для рассматриваемых вариантов ускорителей учитывались силы трения частицы по диску F_{T1} , силы трения по лопасти F_{T2} (либо слою самофутеровки для криволинейных лопастей), инерционная переносная сила F_e и кориолисова сила F_c .

Задача рассматривалась в полярной системе координат. Так как радиальная и угловая координаты жестко связаны профилем лопасти, то система уравнений (1) сводилась к одному уравнению по координате r . Расчетные уравнения при этом для отдельных лопастей имеют вид:

- для лопасти «А» (рисунок 2):

$$\ddot{r} - \frac{\dot{r}^2}{r(\ln a)^2} = -f_1 g \frac{\dot{r}}{\sqrt{(\dot{r})^2 + (\frac{\dot{r}}{\ln a})^2}} - 2f_2 \omega \dot{r} + \omega^2 r + 2\omega \frac{\dot{r}}{\ln a}, \quad (2)$$

где a – коэффициент, задающий радиус витков спирали;

f_1 и f_2 – коэффициенты трения материала соответственно по диску и лопасти.

- для лопасти ускорителя «чБ» (рисунок 2):

$$\ddot{r} = -f_1 g - 2f_2 \omega \dot{r} + \omega^2 r. \quad (3)$$

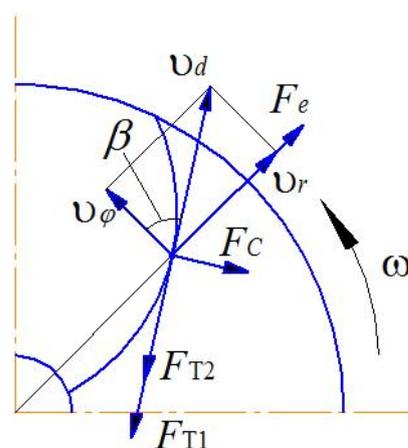


Рисунок 5. – Расчетная схема движения частицы по лопасти

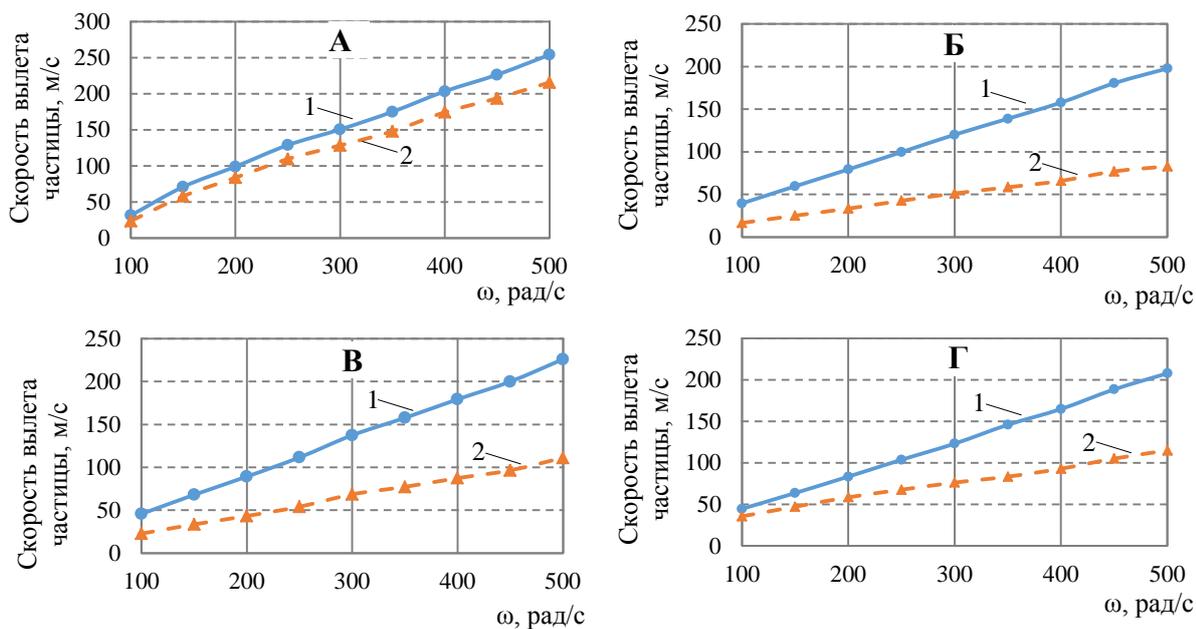
- для лопасти ускорителя «В» (рисунок 2):

$$\ddot{r} = \frac{r}{1 - \left(\frac{r_0}{r}\right)^2} - f_1 g \frac{\dot{r}}{\sqrt{\dot{r}^2 + \frac{r^2}{1 - \left(\frac{r_0}{r}\right)^2}}} - 2f_2 \omega \dot{r} + \omega^2 r - 2\omega \frac{r}{\sqrt{1 - \left(\frac{r_0}{r}\right)^2}}. \quad (4)$$

- для лопасти ускорителя «Г» (рисунок 2):

$$\ddot{r} = \frac{r}{1 - \left(\frac{r_0}{r}\right)^2} - f_1 g \frac{\dot{r}}{\sqrt{\dot{r}^2 + \frac{r^2}{1 - \left(\frac{r_0}{r}\right)^2}}} - 2f_2 \omega \dot{r} + \omega^2 r + 2\omega \frac{r}{\sqrt{1 - \left(\frac{r_0}{r}\right)^2}}. \quad (5)$$

По данным уравнениям были рассчитаны относительная и полная скорости вдоль лопасти, а так же модуль и вектор полной скорости одиночной частицы на выходе из ускорителя. Зависимости скорости вылета частиц от угловой скорости вращения для различных конструкций ускорителей (рисунок 2, А, Б, В, Г) представлены на рисунке 6.



1 – полная скорость вылета частиц; 2 – относительная скорость вылета частиц

Рисунок 6. – Зависимость скорости вылета частиц от угловой скорости вращения ускорителя

Расчетные зависимости показали, что как относительная, так и полная скорости линейно возрастают при изменении угловой скорости ускорителя. Полная скорость для ускорителей с прямыми лопатками примерно вдвое больше относительной и мало зависит от угла расположения лопастей. При криволинейных ло-

пастях ускорителя конструкции А (рисунок 2) разница между этими скоростями значительно меньше, что можно объяснить уменьшением угла между векторами относительной и переносной скоростей частицы.

Углы вылета частиц из ускорителя при использовании прямых лопастей изменяются незначительно – в пределах 15–28°. Величина углов вылета для криволинейных лопастей лежит в пределах 40–60°. Разработанная методика дает возможность рассчитывать оптимальные углы установки отбойных элементов, для достижения максимально эффективного прямого угла удара.

Для учета взаимодействия частиц проведен расчет их движения на основе методов механики сыпучей среды, который базируется на использовании уравнений Навье-Стокса. Как и в случае с одиночной частицей, движение рассматривалось плоским. Более того, в случае жесткой связи радиальной и тангенциальной координат, три уравнения с частными производными преобразуются в одно дифференциальное уравнение, которое для лопастей, повернутых по ходу вращения ускорителя (рисунок 2, В) примет вид:

$$v_r \frac{dv_r}{dr} - r \left(\omega - \frac{r_0}{r^2 \sqrt{1 - \frac{r_0}{r}}} \right)^2 = -\frac{1}{2} \frac{d}{dr} \left[v_r^2 + \left(r\omega - \frac{r_0}{r^2 \sqrt{1 - \frac{r_0}{r}}} \right)^2 \right] + v \left(\frac{d^2 r}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dv_r}{dr} - \frac{v_r}{r^2} \right). \quad (6)$$

Подобные уравнения получены и для других лопастей.

На основании полученной при расчетах радиальной v_r и тангенциальной составляющих скорости была определена полная скорость сыпучей среды на выходе из ускорителя. Из анализа результатов расчетов следует, что скорость сыпучей среды, как и одиночных частиц, возрастает с повышением угловой скорости вращения ускорителя. Несколько выше ее значение при лопастях, повернутых вперед. Скорости, определенные по обоим методикам, близки по значению. Из этого следует, что для инженерных расчетов достаточно обосновано может применяться модель движения одиночных частиц.

В целом предложенная методика дает возможность рассчитать два важнейших параметра на выходе из ускорителя: скорость и угол отрыва измельчаемых частиц. По углу и скорости отрыва определяются угол атаки и скорость удара частиц об отбойную поверхность.

Величина износа прямо пропорциональна скорости удара, его зависимость от угла атаки несколько сложнее. Это обусловлено тем, что проникновение абразивных частиц в материал отбойных элементов сопровождается упругой, пластической деформацией, плавлением, образованием лунки и выдавли-

ванием расплавленного материала отбойного элемента на его поверхность. На основе расчета скорости и угла атаки был сделан анализ износа прямых лопастей на ускорителе. Доказано, что чем дальше от центра вращения ускорителя происходит встреча частиц с лопастями, тем большая ударная нагрузка воздействует на поверхность лопасти. Поэтому износ лопастей, повернутых против хода вращения ускорителя, будет максимальным.

Скорость удара материала об отбойные элементы для всех ускорителей находится в интервале максимального значения износа – 100–200 м/с. Угол атаки в принятой схеме установки отбойных элементов для всех прямых лопастей близок к 90°, когда износ минимален. Для криволинейных лопастей он составляет 56° и находится в интервале максимального износа.

Отбойная поверхность ударно-центробежных мельниц может интенсивно изнашиваться от трения частиц, повторных ударов и других неучтенных факторов. Однако для предварительной оценки износа можно ограничиться значениями скорости и угла удара частиц об отбойные элементы.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований процесса помола в центробежно-ударной мельнице с применением различных конструкций ускорителей. В качестве исходного материала применялся сеянный кварцевый песок фракции 0–2,5 мм, содержание фракции менее 0,5 мм составляло до 10%, влажность до 1%. Производительность установки – 300 кг/ч. В процессе опытов изменялся угол установки лопастей встроенного классификатора, от которого зависит дисперсность готового продукта. При помоле на каждой конструкции ускорителя его значение составляло 30°, 45° и 60°.

Основная цель первого этапа работы заключалась в исследовании зависимости энергоэффективности измельчения от частоты вращения ускорителя. Эксперименты проводились с применением традиционно используемого закрытого типа ускорителя «А_{об}» (аналогичного типу «А» со сплошной боковой обечайкой) при частоте его вращения 3700, 4000, 4200 и 4500 об/мин. Угол поворота лопаток встроенного классификатора составлял 45°. По результатам экспериментов определялся грансостав и удельная поверхность измельченных продуктов, а также энергозатраты на процесс помола. Грансостав полученных продуктов показан на рисунке 7. Удельные энергозатраты на стадии эксперимента рассчитывались в кВт·ч на единицу удельной поверхности (см²) измельченного продукта. Их зависимость от линейной скорости ускорителя показана на рисунке 8.

В процессе экспериментов была установлена оптимальная с точки зрения энергоэффективности скорость измельчения, составляющая 100–105 м/с, которая достигается при частоте вращения ускорителя 4200 об/мин. Расчетная скорость вылета частиц из ускорителя при этом составляет 190–220 м/с.

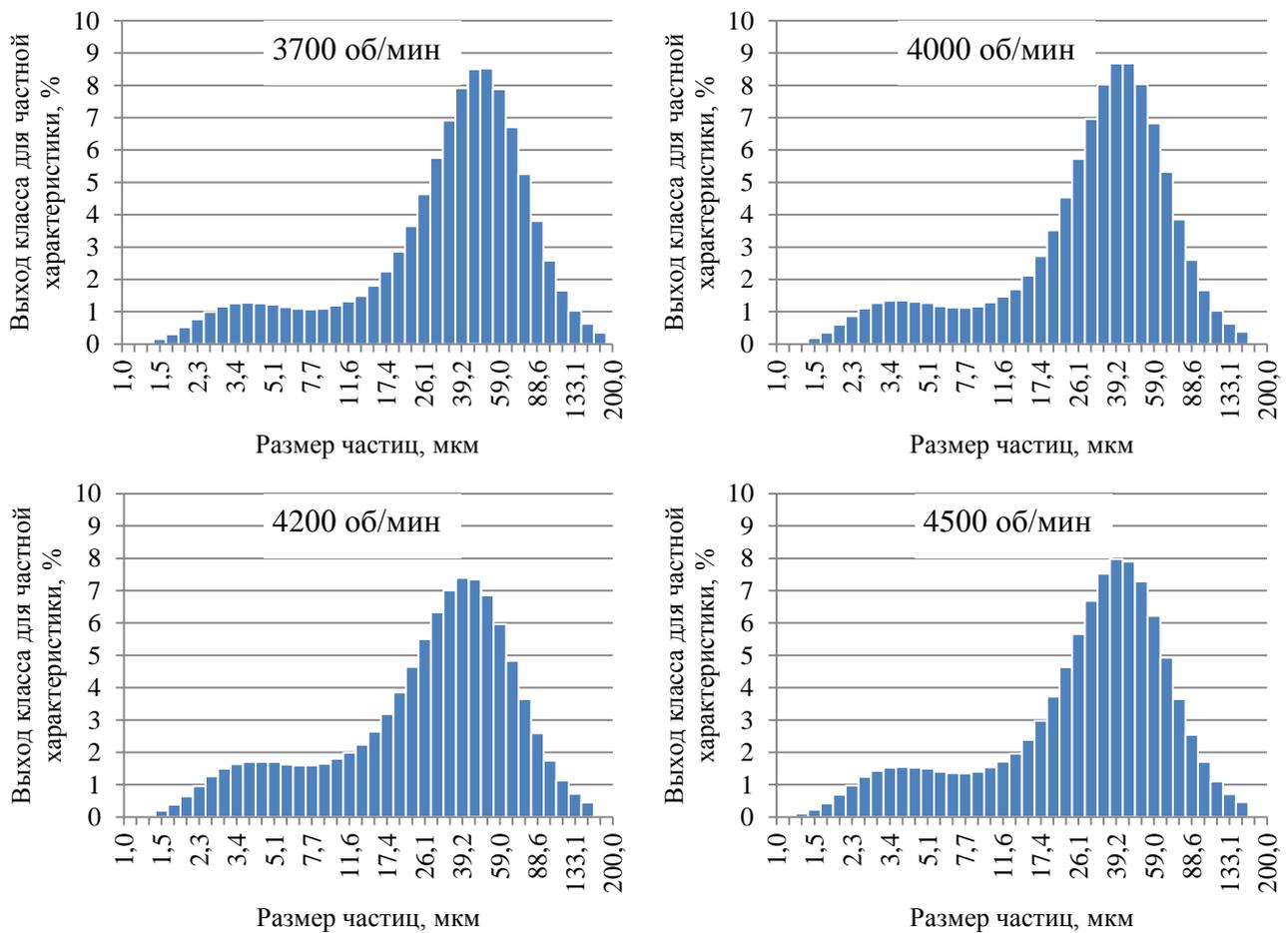


Рисунок 7. – Зависимость грансостава измельченного материала от частоты вращения ускорителя

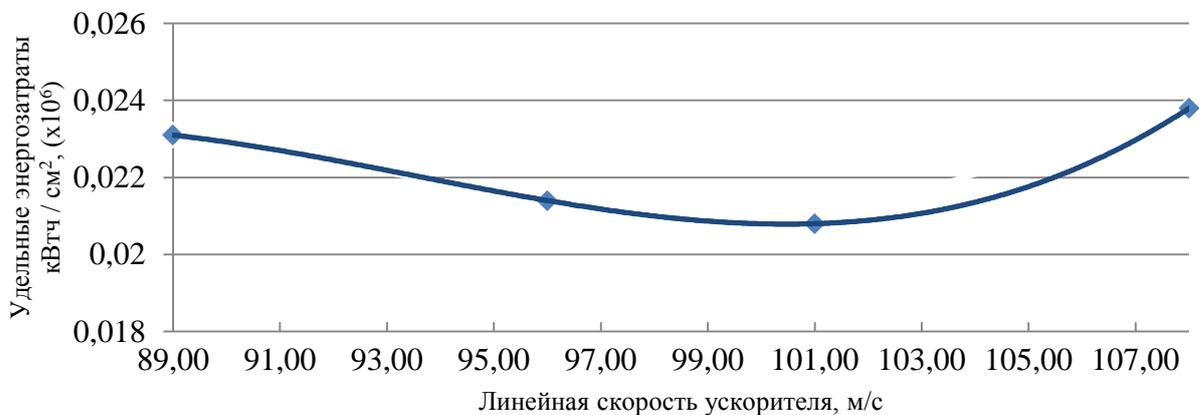


Рисунок 8. – Зависимость удельных энергозатрат от линейной скорости ускорителя

На следующем этапе были проведены экспериментальные исследования зависимости энергоэффективности помолы от конструктивных параметров ускорителей (рисунок 2, А, Б, В, Г). Исследования проводились при определенной на первом этапе оптимальной скорости удара с получением продуктов различного гранулометрического состава. Грансостав менялся путем установки лопаток встроенного инерционного классификатора под углом 30°, 45° и 60° от вертикали. Сравнение удельных энергозатрат для разных схем установки лопастей ускорителя приведено на рисунке 9.

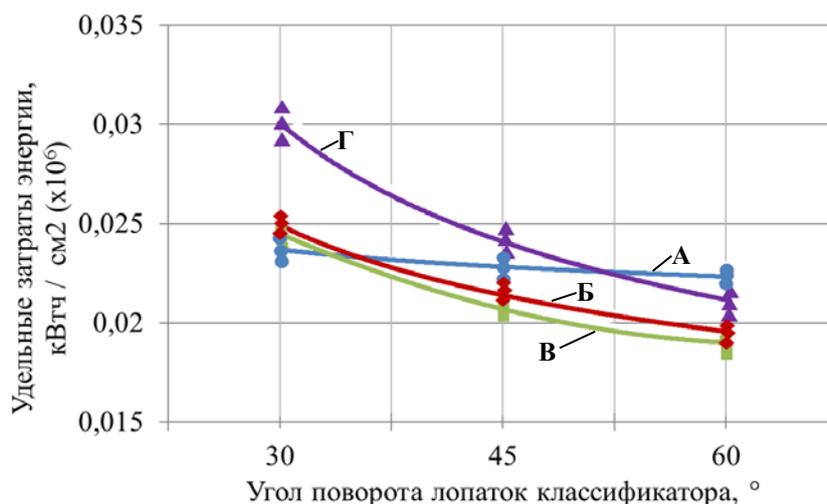
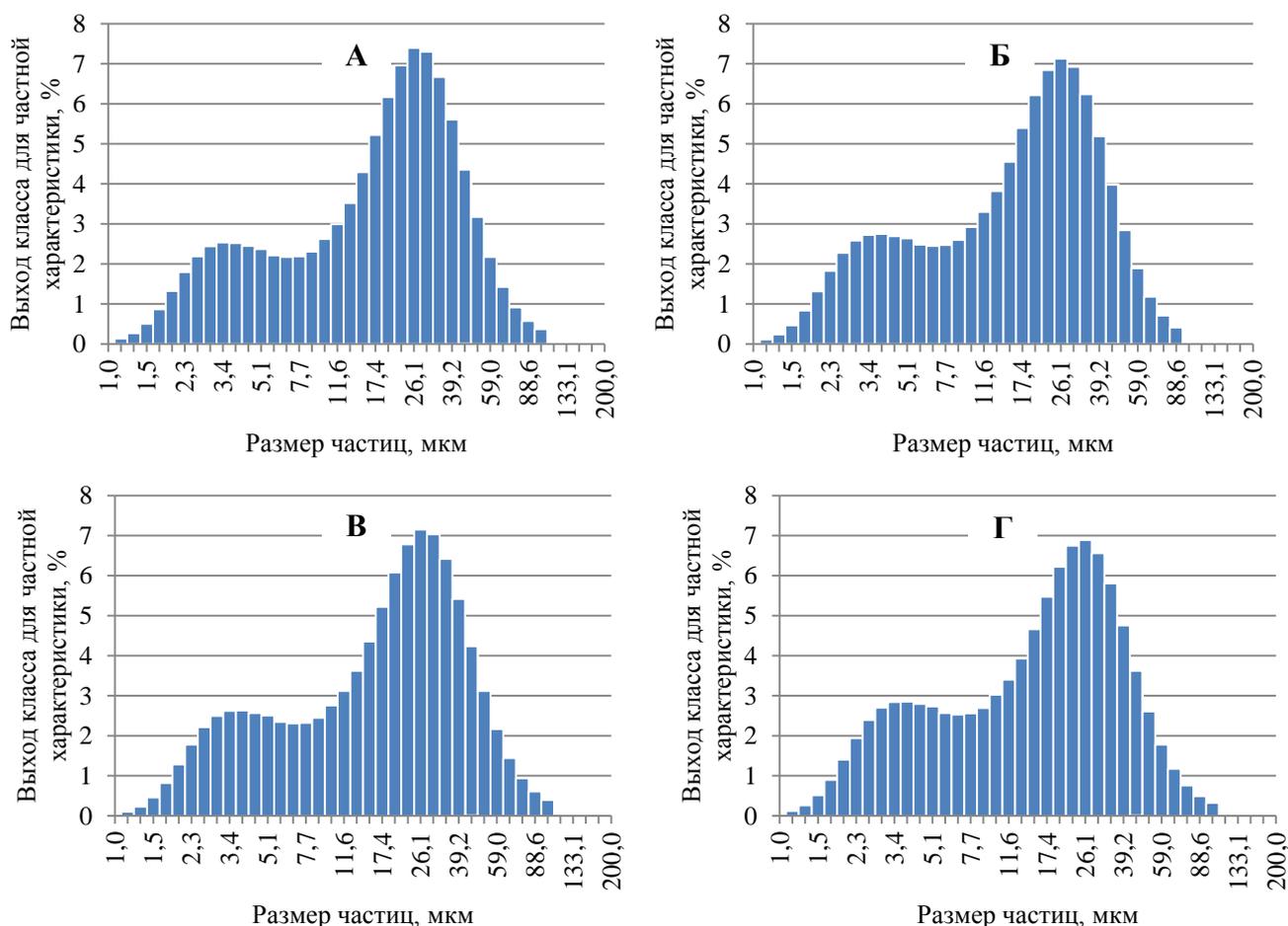


Рисунок 9. – Сравнение удельных энергозатрат на процесс помола, в зависимости от типа ускорителя

Гранулометрический состав измельченного продукта для разных ускорителей при угле установки лопаток классификатора 60° показан на рисунке 10.



А, Б, В, Г – типы ускорителей (рисунок 2)

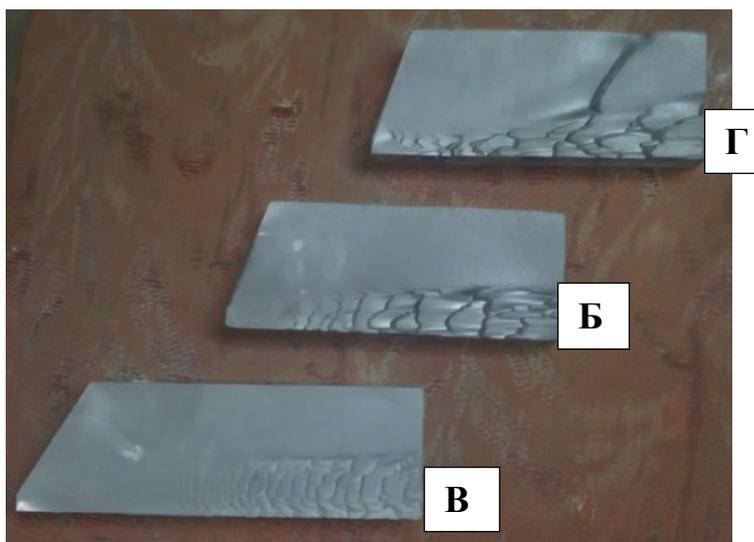
Рисунок 10. – Гранулометрический состав измельченного продукта для разных типов ускорителей при угле установки лопаток классификатора 60°

Наименьшие удельные затраты были получены на ускорителе с прямыми, установленными тангенциально по ходу вращения, лопастями (рисунок 2, В). Близкий результат отмечен и в ускорителе с радиальными лопастями (рисунок 2, Б). Криволинейные лопасти (рисунок 2, А) показали наименьшие энергозатраты при получении грубых продуктов (при угле поворота лопаток классификатора 30°). При тонкодисперсном измельчении (угол 60°) из-за неоптимальных углов удара их энергоэффективность снижается. Наименее энергоэффективной оказалась конструкция с прямыми лопастями, установленными тангенциально против хода вращения (рисунок 2, Г).

На следующем этапе были проведены экспериментальные исследования влияния конструктивных параметров центробежно-ударной мельницы на интенсивность процесса износа. Износостойкость оценивалась по потере массы основных быстроизнашивающихся элементов ускорителя и отбойной поверхности на получение тонны кварцевого песка, кг/т.

В конструкциях ускорителей с криволинейными лопастями без боковой обечайки «А» и с боковой обечайкой «А_{об}» износ лопаток практически не наблюдался, т. к. вследствие изогнутой конструкции на их поверхности создается слой материала, защищающий от износа. Износ верхнего и нижнего дисков на различных типах ускорителей был идентичен. Существенное отличие наблюдалось только в конструкции ускорителя с повернутыми против хода вращения лопастями (рисунок 2, Г). Зона износа вдоль лопастей и на краях диска была значительно шире, чем в других конструкциях ускорителей. Это подтверждает выводы, сделанные на основе расчетов и экспериментальных исследований энергоэффективности измельчения. В конструкции «Г» значительная часть материала действительно свободно движется в ускорителе не контактируя с лопастями. Наибольший износ был отмечен на прямых разгонных лопастях (рисунок 11).

При всех углах их установки наблюдался «чешуйчатый» характер износа. Наименее износостойкими оказались лопасти конструкции «Г», где контакт частиц с лопастью происходит ближе к ее периферийной части, причем угол контакта находится в диапазоне максимального износа $20-60^\circ$. Гистограмма параметров износа ускорителей представлена на рисунке 12. По результатам ис-



Б, В, Г – типы ускорителей (рисунок 2)

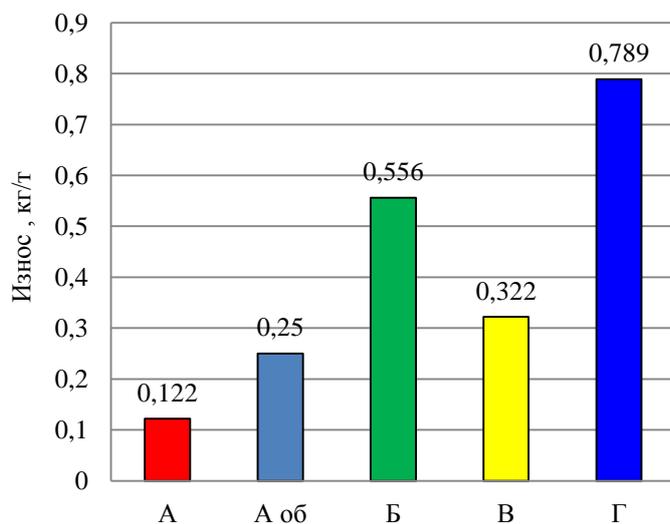
Рисунок 11. – Износ лопаток открытых типов ускорителей

следований можно сделать вывод, что использование криволинейных лопастей позволяет снизить интенсивность процесса износа как минимум в 2,5 раза. Это особенно важно при помоле таких абразивных материалов, как кварцевый песок.

В то же время при помоле мягких материалов, таких как известь, использование прямых лопастей оправдано с точки зрения простоты и более низкой стоимости конструкции. Здесь следует применить конструкцию с лопастями, установленными тангенциально по ходу вращения (рисунок 2, В), которая изнашивается в 1,7 раза меньше, чем при прямых радиальных лопастях «Б» и в 2,4 раза меньше чем при лопастях, установленных тангенциально против хода вращения «Г».

Кроме ускорителя в конструкции центробежно-ударной мельницы наиболее интенсивный износ происходит на отбойной поверхности. Исследование износа отбойных плит показало, что при помоле на различных конструкциях ускорителей характер износа почти не отличается. Вместе с тем, значительное влияние на износ оказывает материал, из которого они изготовлены. Были проведены исследования износа традиционно используемых отбойных плит из хромистого чугуна (ИЧХ) и отбойных плит с керамическими накладками из карбида кремния и карбида бора (рисунок 13). Отмечен значительно меньший износ отбойных элементов из карбида бора, в 20 раз меньше по сравнению с отбойными элементами из износостойкого хромистого чугуна и в 6 раз меньше элементов из карбида кремния.

Сравнение относительного износа отбойных плит при использовании различных конструкций ускорителей представлено на рисунке 14. Наименьший износ отбойной поверхности отмечался при использовании конструкции с ло-



А, Б, В, Г – типы ускорителей (рисунок 2);

А_{об} – ускоритель с боковой обечайкой

Рисунок 12. – Параметры износа ускорителей различных конструкций

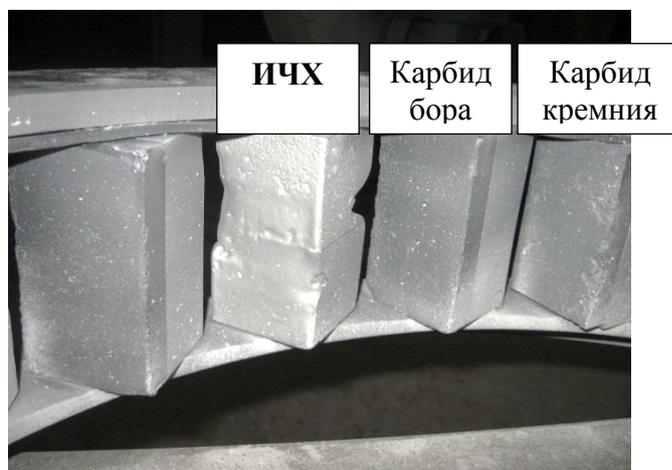
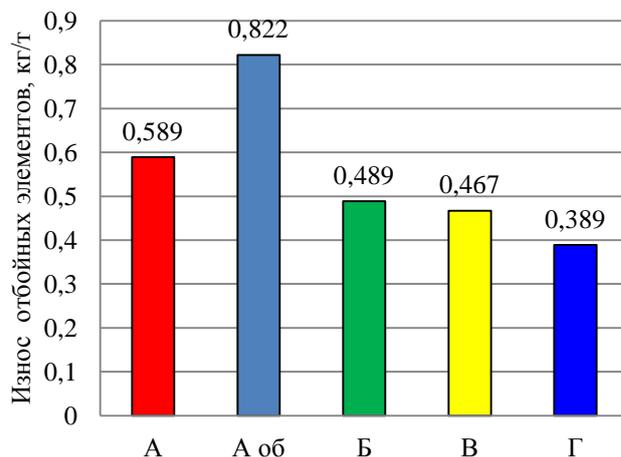


Рисунок 13. – Характер износа отбойных плит в камере измельчения

пастями, установленными тангенциально против хода вращения (рисунок 2, Г), где часть материала свободно движется по диску ускорителя, не контактируя с лопастями, и вылетает хаотично с невысокой скоростью. Использование криволинейных лопастей ускорителей (А, А_{об}) повысило износ отбойных элементов. Это обусловлено более высокой скоростью вылета частиц из ускорителя и отклонением от оптимума углов установки отбойных элементов.

Анализируя результаты, полученные во время проведения экспериментов, отмечено, что наименьшие энергозатраты в процессе измельчения материалы были получены при использовании ускорителей конструкций «В» и «А_{об}». Низкие энергозатраты конструкции «В» подтверждены результатами расчетов скорости и угла вылета частиц из ускорителя. В конструкции «А_{об}» высокая энергоэффективность достигается за счет снижения боковой обечайкой объема воздушного потока, проходящего через ускоритель. На основании экспериментальных и теоретических исследований и выводов, сделанных выше, была разработана конструкция ускорителя с отводящими элементами (рисунок 15). Они выполнены в виде прямоугольных стальных пластин и располагаются вне зоны интенсивного движения частиц материала, которая определена при расчете их траектории. Данные элементы препятствуют прохождению через ускоритель воздушного потока, который интенсивно воздействует на траекторию движения мелких частиц. Он отклоняет их от оптимальной траектории, соответствующей наиболее эффективному удару. В результате увеличивается циркуляционная нагрузка и снижается энергоэффективность помола.

Исследования новой конструкции показали, что ее применение позволяет снизить удельные энергозатраты в зависимости от тонины помола на 2,4–4,7%. Износ ускорителя при этом по сравнению с ускорителями снабженными



А, Б, В, Г – типы ускорителей (рисунок 2);

А_{об} – ускоритель с боковой обечайкой

Рисунок 14. – Зависимость износа отбойных плит от типа ускорителя



Рисунок 15. – Разработанный ускоритель с отводящими элементами

прямыми лопастями снижается не менее чем на 11%. По сравнению с традиционной закрытой конструкцией ускорителя износ уменьшается в 1,5–1,7 раза.

В четвертой главе приведены результаты промышленных испытаний новой конструкции ускорителя с отводящими элементами с одновременной оптимизацией углов установки элементов отбойной поверхности в соответствии с разработанной методикой расчета.

Использование разработанной конструкции ускорителя в измельчительном комплексе КИ-1,0 на производстве ОАО «РУСАЛ-Бокситогорск» (РФ) при получении белого плавленого электрокорунда дало возможность снизить износ ускорителя на 35–37%. Оптимизация угла установки отбойных элементов и снижение энергозатрат позволили повысить производительность от 2 до 2,2 т/ч.

Следующий этап испытаний проведен при производстве флюидизированной извести ЗАО «Урал-Омега», РФ. До модернизации удельный расход электроэнергии в центробежной мельнице составлял 20 кВт ч/т, при остатке на сите №01 – 2 %, на сите №008 – 6,5 %. При модернизации был установлен ускоритель разработанной конструкции, а также изменен угол установки отбойных элементов. В результате при одинаковых параметрах процесса помола и характеристиках готового продукта, расход электроэнергии после модернизации центробежно-ударной мельницы составил 18 кВт ч/т, производительность комплекса выросла на 10%.

Испытания разработанной конструкции ускорителя проводились также в ОАО «Полоцк-Стекловолокно» при получении кварцевого молотого песка с остатком на сите 63 мкм не более 15% с производительностью 5 т/ч. Ее ресурс работы увеличился более чем в 2 раза по сравнению с традиционной конструкцией, энергозатраты на помол снизились на 7%.

Эффективность разработанного ускорителя была подтверждена и в Филиале «Гомельский ГОК» ОАО «Гомельстекло», где на комплексе КИ-1,0 получают кварц пылевидный марки А, в котором допустимый остаток на сите 50 мкм не должен превышать 15%. Производительность комплекса составляет 2 т/ч. При этом разработанный ускоритель изнашивался на 70% менее интенсивно, чем ранее применяемая конструкция с боковой обечайкой.

По результатам испытаний конструкция ускорителя с отводящими элементами утверждена ОАО «НПО Центр» в качестве основной для выпускаемых центробежно-ударных мельниц при помолу материалов с твердостью по шкале Мооса более пяти.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработан метод определения скорости и траектории движения частиц измельчаемого материала в межлопастном пространстве ускорителей различных конструкций. Составлена математическая модель движения частиц в трех основных зонах ускорителя: центральной загрузочной части с конусом-распределителем, что позволило определить начальную скорость и угол входа частиц в межлопастное пространство; средней зоне, где осуществляется движение материала вдоль поверхности лопастей и в зоне отрыва от ускорителя – с последующим ударом об отбойные элементы. Рассчитаны оптимальные геометрические параметры ускорителя и отбойной поверхности центробежно-ударных мельниц. Проведен анализ полученных данных по скорости и углу отрыва для разных вариантов ускорителей. Установлено, что скорость и угол мало зависят от схемы установки прямолинейных лопастей. При их использовании угол вылета частиц составляет $15\text{--}28^\circ$, скорость $200\text{--}230$ м/с. С применением криволинейных лопастей скорость повышается до 250 м/с, угол вылета частиц находится в пределах $40\text{--}60^\circ$, что значительно отличается от угла вылета с прямых лопастей ($15\text{--}28^\circ$) [1-А, 3-А, 5-А, 6-А, 18-А].

2. Составлено математическое описание и разработана методика расчета скорости движения измельчаемого материала с учетом взаимодействия частиц, основанная на решении уравнений механики сыпучей среды, подтвердившая возможность использования при инженерных расчетах методов анализа движения отдельных частиц и позволяющая получать расчетную величину эффективности измельчения и абразивного износа для любой конструкции ускорителя. Результаты теоретических исследований позволили установить закономерности влияния конструктивных особенностей ускорителей на эффективность измельчения, абразивный износ, а также обеспечить расчет оптимальных параметров камеры измельчения ударно-центробежных мельниц для получения в ней максимальной энергоэффективности процесса помола [1-А, 3-А, 23-А].

3. Установлены закономерности изменения энергоэффективности процесса измельчения в зависимости от конструктивных параметров ускорителя ударно-центробежной мельницы, дающие возможность достигать ее максимальных значений при различной дисперсности конечного продукта. Установлено, что для кварцевого песка наибольшая энергоэффективность достигается при линейной скорости ускорителя $100\text{--}105$ м/с при установке лопастей тангенциально по ходу вращения ускорителя. При повороте лопастей против хода вращения энергоэффективность процесса измельчения снижается [2-А].

4. Установлены закономерности изменения абразивного износа в зависимости от конструктивных параметров ускорителя. Отмечена высокая интенсивность износа прямых лопаток открытых типов ускорителей и обечайки закрытого типа. Наименьший износ был зафиксирован при использовании криволинейных лопастей, защищаемых слоем самофутеровки.

Наибольший износ отбойной поверхности в камере измельчения наблюдался вследствие более высокой концентрации материала при использовании ускорителя с боковой обечайкой. Применение на отбойных элементах дополнительных керамических накладок позволяет значительно повысить их стойкость. Износ традиционно используемого отбойного элемента из износостойкого хромистого чугуна при помоле 1 тонны кварцевого песка составил в среднем 0,023 кг, из карбида бора – 0,001 кг; из карбида кремния – 0,006 кг.

Данные по износу в сочетании с величиной энергоэффективности позволили выбрать оптимальное исполнение ускорителя, угол установки элементов отбойной поверхности и конструктивный материал быстроизнашивающихся поверхностей [4-А, 19-А, 20-А].

5. На основе расчетных данных и экспериментальных исследований разработана конструкция ускорителя с отводящими элементами. Доказана ее более высокая энергоэффективность по сравнению с ранее использованными конструкциями. Удельные энергозатраты при ее использовании снизились в среднем на 3,6%. По сравнению с традиционной закрытой конструкцией ускорителя износ снижается в 1,7 раза [6-А, 24-А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Полученные результаты могут быть использованы при расчете, проектировании и эксплуатации центробежно-ударных мельниц.

Оптимальной является конструкция ускорителя со специальными отводящими элементами, позволяющими при значительном снижении износа повысить энергоэффективность процесса помола. При измельчении низкоабразивных материалов с твердостью по шкале Мооса 1–4 целесообразно использование прямых лопастей, установленных тангенциально по ходу вращения ускорителя. При измельчении высокоабразивных материалов с твердостью по шкале Мооса 5–10 – криволинейных лопастей в виде логарифмической кривой.

Угол установки элементов отбойной поверхности необходимо устанавливать в соответствии с углом вылета частиц из ускорителя, рассчитанного по методике, приведенной в главе 2. При использовании прямых лопастей он должен составлять 15–28°, при использовании криволинейных лопастей 40–60°.

Использование отбойных элементов с керамическими накладками позволяет значительно повысить стойкость отбойной поверхности. Наиболее стой-

кими при ударно-истирающем воздействии показали себя элементы из карбида бора, стойкость которых более чем в 20 раз превысила стойкость элементов из износостойкого хромистого чугуна. Однако их использование целесообразно только при крупности частиц исходного материала менее 5 мм из-за риска скола высокотвердой керамики [7-А-17-А, 21-А, 22-А].

2. Проведенные промышленные испытания на ОАО «Русал-Бокситогорск» и ЗАО «Урал-Омега» подтвердили эффективность использования разработанной конструкции ускорителя и методики расчета движения частиц с определением оптимальных углов установки элементов отбойной поверхности. Данная конструкция принята в качестве основной при помоле материалов с твердостью по шкале Мооса более пяти [24-А-28-А].

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных изданиях, включенных в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований

1-А. Вайтехович, П.Е. Описание движения материала в роторе-ускорителе центробежно-ударной дробилки / П.Е. Вайтехович, П.С. Гребенчук, А.В. Таболич // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорганич. в-в. – 2014 г., г. Минск: БГТУ. – С. 102–104.

2-А. Таболич, А.В. Получение высококачественного кубовидного щебня при применении технологии центробежно-ударного дробления / А.В. Таболич, В.В. Воробьев, Е.Н. Иванов, С.Н. Бондаренко // Горная механика и машиностроение. – 2014. – №2. – С. 42–50.

3-А. Вайтехович, П.Е. Движение измельчаемого материала по поверхности ускорителя ударно-центробежной мельницы / П.Е. Вайтехович, П.С. Гребенчук, А.В. Таболич // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2015. – №7. – С. 7–8.

(Vaitekhovich P.E. Motion of grindable material on the surface of the accelerator of a centrifugal-impact mill / P.E. Vaitekhovich, P.S. Grebenchuk, A.V. Tabolich // Chemical and Petroleum Engineering – 2015. Vol.51, No.7–8. – P. 452–455.

4-А. Таболич, А.В. Конструкционные возможности повышения износостойкости ускорителей центробежно-ударных мельниц / А.В. Таболич, С.Н. Бондаренко // Горная механика и машиностроение. – 2016. – №2. – С. 71–77.

5-А. Вайтехович, П.Е. Влияние конструктивных особенностей ротора на скорость измельчаемого материала в центробежно-ударных дробилках / Вайтехович П.Е., Гребенчук П.С., Таболич А.В., Верховодка А.А. // Горная механика и машиностроение – 2017. – № 2. – С. 76–95.

6-А. Вайтехович, П.Е. Определение основных параметров ударного взаимодействия абразивных частиц с лопастями ротора-ускорителя центробежной мельницы / П.Е. Вайтехович, Д.Н. Боровский, А.В. Таболич, П.С. Гребенчук // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2018. – №3. – С. 12–15.

(Vaitekhovich P.E. Determination of the basic parameters of impact interaction of abrasive particles against the blades of the rotor accelerator of a centrifugal mill / P.E. Vaitekhovich, D.N. Borovskii, P.S. Grebenchuk, A.V. Tabolich // Chemical and Petroleum Engineering – 2018. Vol.54, No.3–4. – P. 156–159).

Материалы конференций

7-А. Воробьев, В.В. Центробежно-ударные мельницы для измельчения сырьевых материалов в производстве ячеистых бетонов / В.В. Воробьев, Е.Н. Иванов, А.В. Таболич, П.В. Тенюта, Г.А. Тимофеева // Центробежная техника – высокие технологии: материалы 3-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 9–11 сентября 2008 г. / УП «НПО «Центр»; редкол.: В.В. Воробьев [и др.]. – Минск, 2008. – С. 80–83.

8-А. Иванов, Е.Н. Перспективы использования оборудования УП «НПО «Центр» в производстве компонентов сухих строительных смесей / Е.Н. Иванов, А.В. Таболич, О.П. Шиманович, Г.А. Тимофеева // Центробежная техника – высокие технологии: материалы 3-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 9–11 сентября 2008 г. / УП «НПО «Центр»; редкол.: В.В. Воробьев [и др.]. – Минск, 2008. – С. 83-86.

9-А. Иванов, Е.Н. Опыт получения высококачественных стекольных песков на оборудовании УП «НПО «Центр» / Е.Н. Иванов, А.В. Таболич // Центробежная техника – высокие технологии: материалы 3-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 9–11 сентября 2008 г. / УП «НПО «Центр»; редкол.: В.В. Воробьев [и др.]. – Минск, 2008. – С. 86–90.

10-А. Иванов, Е. Н. Технологии и оборудование переработки отходов в промышленности строительных материалов с использованием оборудования УП «НПО «Центр» / Е. Н. Иванов, А. В. Таболич, П. П. Шиманович // Новые технологии рециклинга отходов производства и потребления: материалы конференции, Минск, 23–24 ноября 2011 г. / БГТУ; редкол.: И. М. Жарский [и др.]. – Минск, 2011. – С. 26–29.

11-А. Иванов, Е.Н. Опыт применения ударно-центробежных дробилок УП «НПО «Центр» в обогащении хризотил-асбеста / Е.Н. Иванов, А.В. Таболич, П.П. Шиманович // Переработка минерального сырья. Инновационные технологии и оборудование: материалы 4-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 27–28 ноября 2012 г. / УП «НПО «Центр»; редкол.: В.В. Воробьев [и др.]. – Минск, 2012. – С. 51–54.

12-А. Воробьев, В.В. Процессы механической активации компонентов бетона и влияние различных способов активации на его механические свойства / В.В. Воробьев, А.В. Таболич // Переработка минерального сырья. Инновационные технологии и оборудование: материалы 4-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 27–28 ноября 2012 г. / УП «НПО «Центр»; редкол.: В.В. Воробьев [и др.]. – Минск, 2012. – С. 54–57.

13-А. Воробьев, В.В. Центробежно-ударные мельницы для измельчения сырьевых материалов в производстве ячеистых бетонов / В.В. Воробьев, Е.Н. Иванов, А.В. Таболич, П.П. Шиманович // Опыт производства и

применения ячеистого бетона автоклавного твердения: материалы 8-й Междунар. научно-практической конференции, Минск – Могилев, 11–13 июня 2014 г. / Министерство архитектуры и строительства РБ; редкол.: Н.П. Сажнев [и др.]. – Минск: 2014. – С. 28–32.

14-А. Воробьев, В.В. Получение высококачественного кубовидного щебня при применении технологии центробежно-ударного дробления / В.В. Воробьев, Е.Н. Иванов, А.В. Таболич // Наука, техника и инновационные технологии в эпоху могущества и счастья: материалы 7-й Международной научной конференции, Ашхабад, 12–14 июня 2014 г. / Академия наук Туркменистана; редкол: М. Ашырбаев. – Ашхабад, 2014. – С. 235–236.

15-А. Таболич, А.В. Исследования влияния активации отдельных компонентов бетона на его прочность / А.В. Таболич, П.П. Шиманович, В.А. Красильников // Переработка минерального сырья. Инновационные технологии и оборудование: материалы 5-й Международной научно-технической конференции, Минск, 24–25 ноября 2014 г. / ОАО «НПО Центр»; редкол.: В.В. Воробьев [и др.]. – Минск, 2014. – С. 18–22.

16-А. Таболич, А.В. Исследования влияния комплексной активации компонентов бетона на его прочность / А.В. Таболич, П.П. Шиманович, В.А. Красильников // Переработка минерального сырья. Инновационные технологии и оборудование: материалы 5-й Международной научно-технической конференции, Минск, 24–25 ноября 2014 г. / ОАО «НПО Центр»; редкол.: В.В. Воробьев [и др.]. – Минск, 2014. – С. 22–24.

17-А. Вайтехович, П.Е. Движение измельчаемого материала в роторе-ускорителе центробежно-ударных измельчителей / П.Е. Вайтехович, А.В. Таболич, П.С. Гребенчук // Переработка минерального сырья. Инновационные технологии и оборудование: материалы 5-й Международной научно-технической конференции, Минск, 24–25 ноября 2014 г. / ОАО «НПО Центр»; редкол.: В.В. Воробьев [и др.]. – Минск, 2014. – С. 56–59.

18-А. Таболич, А.В. Способы повышения износостойкости конструкции ускорителя центробежно-ударных мельниц ОАО «НПО Центр» / А.В. Таболич, Е.Н. Иванов, С.Н. Бондаренко // Переработка минерального сырья. Инновационные технологии и оборудование: материалы 6-й Международной научно-технической конференции, Минск, 4–5 октября 2016 г. / ОАО «НПО Центр»; редкол.: В.В. Воробьев [и др.]. – Минск, 2016. – С. 9–14.

19-А. Таболич, А.В. Способы повышения износостойкости отбойных элементов центробежно-ударных мельниц ОАО «НПО Центр» / А.В. Таболич, Е.Н. Иванов, С.Н. Бондаренко // Переработка минерального сырья. Инновационные технологии и оборудование: материалы 6-й Международной научно-технической конференции, Минск, 4–5 октября 2016 г. / ОАО «НПО Центр»; редкол.: В.В. Воробьев [и др.]. – Минск, 2016. – С. 14–17.

20-А. Таболич, А.В. Опыт применения технологии и оборудования ОАО «НПО Центр» по переработке отсеков дробления горных пород при производстве гранитного щебня на РУПП «Гранит» / А.В. Таболич, В.А. Красильников, П.П. Шиманович // Переработка минерального сырья. Инновационные технологии и оборудование: материалы 6-й Международной научно-технической конференции, Минск, 4–5 октября 2016 г. / ОАО «НПО Центр»; редкол.: В.В. Воробьев [и др.]. – Минск, 2016. – С. 70–74.

21-А. Воробьев, В.В. Ударное дробление в производстве щебня для балласта железнодорожного пути / В.В. Воробьев, Е.Н. Иванов, А.В. Таболич // Переработка минерального сырья. Инновационные технологии и оборудование: материалы 6-й Международной научно-технической конференции, Минск, 4–5 октября 2016 г. / ОАО «НПО Центр»; редкол.: В.В. Воробьев [и др.]. – Минск, 2016. – С. 77–80.

Тезисы докладов

22-А. Вайтехович, П.Е. Модель движения сыпучей среды в межлопастном пространстве ротора-ускорителя / П.Е. Вайтехович, П.С. Гребенчук, А.В. Таболич // 78-ая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием): тезисы докладов, Минск, 3–13 февраля 2014 г. / БГТУ; редкол.: И. М. Жарский [и др.]. – Минск, 2014. – С. 49.

23-А. Таболич, А.В. Оборудование и технологии ОАО «НПО Центр для сухого обогащения стекольных кварцевых песков / А.В. Таболич, В.А. Красильников, Е.Н. Иванов // 78-ая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов: тезисы, Минск, 3–13 февраля 2014 г. / БГТУ; редкол.: И. М. Жарский [и др.]. – Минск, 2014. – С. 38.

Патенты

24-А. Рабочий орган устройства для ударно-центробежного измельчения: пат. 179319 РФ, МПК В02С13/14 / Бородавко В.И., Бутяев А.Г., Воробьев В.В., Иванов Е.Н., Красильников В.А., Нефёдов А.К., Семененко Д.В., Таболич А.В., Усов В.Г.; заявитель ОАО «НПО Центр». – 2017134171; заявл. 02.10.2017; опубл. 08.05.2018 // Официальный бюл. / Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 2018. – №13. – С. 25.

25-А. Мельница для ударно-центробежного измельчения материала: пат. 2554976 РФ, МПК В 02 С13/14, В 02 С 23/12 / В.И. Бородавко, В.В. Воробьев,

В.В. Гуринович, Е.Н. Иванов, А.Ю. Козин, В.А. Красильников, А.В. Таболич, П.П. Шиманович; заявитель ОАО «НПО Центр». – 2013143933/13; заявл. 30.09.2013; опубл. 10.07.2015 // Официальный бюл. / Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 2015. – №19. – С. 22.

26-А. Мельница для ударно-центробежного измельчения материала: пат. 20755 Респ. Беларусь, МПК В 02 С 23/12 / В.И. Бородавко, В.В. Воробьев, В.В. Гуринович, Е.Н. Иванов, А.Ю. Козин, В.А. Красильников, А.В. Таболич, П.П. Шиманович; заявитель ОАО «НПО Центр». – а 20131090; заявл. 18.09.2013; опубл. 30.04.2015 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2015. – №7. – С. 34.

27-А. Ударно-центробежная мельница: пат. 138154 РФ, МПК В 02 С 23/12 / В.И. Бородавко, В.В. Воробьев, В.В. Гуринович, Е.Н. Иванов, А.Ю. Козин, В.А. Красильников, А.В. Таболич, П.П. Шиманович; заявитель ОАО «НПО Центр». – 2013143905/13; заявл. 30.09.2013; опубл. 10.03.2014 // Официальный бюл. / Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 2014. – №7. – С. 29.

28-А. Ударно-центробежная мельница: пат. 10041 Респ. Беларусь, МПК В 02 С 23/12 / В.И. Бородавко, В.В. Воробьев, В.В. Гуринович, Е.Н. Иванов, А.Ю. Козин, В.А. Красильников, А.В. Таболич, П.П. Шиманович; заявитель ОАО «НПО Центр». – и 20130750; заявл. 23.09.2013; опубл. 30.04.2014 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2014. – №7. – С. 21.

РЭЗІЮМЭ

Таболіч Андрэй Віктаравіч

Здрабненне высокаабразіўных матэрыялаў у цэнтрабежна-ударных млынах

Ключавыя словы: млын, удар, класіфікатар, хуткасць, паскаральнік, магутнасць, энергаэфектыўнасць, энергаёмістасць, знос, выпрабаванні.

Аб'ект даследавання – цэнтрабежна-ударны млын.

Мэтай дысертацыйнай работы з'яўляецца пошук і навуковае абгрунтаванне новых тэхнічных рашэнняў па павышэнню энергаэфектыўнасці працэсу памолу, дысперснасці канчатковага прадукту і зніжэння абразіўнага зносу ў здрабняльніках цэнтрабежна-ударнага прынцыпу дзеяння.

У рабоце прааналізаваны канструкцыі цэнтрабежна-ударных млыноў. Вызначаны іх перавагі і недахопы, спосабы павышэння энергаэфектыўнасці і зносаўстойлівасці. Праведзены аналіз работ па матэматычнаму мадэляванню руху матэрыялу ў камеры здрабнення. Устаноўлена, што найбольш перспектыўным спосабам з'яўляецца аптымізацыя канструктыўных параметраў паскаральніка і вугла устаноўкі элементаў адбойнай паверхні.

Тэарэтычныя даследванні дазволілі стварыць мадэль руху часцінак матэрыялу ў межлопасцевай прасторы розных канструкцый паскаральнікаў цэнтрабежна-ударных млыноў, вызначыць хуткасць і вугал вылету часцінак з паскаральніка, ацаніць іх уплыў на энергаэфектыўнасць здрабнення і абразіўны знос.

Вынікі эксперыментальнага вывучэння працэсу здрабнення ў розных канструкцыях паскаральнікаў цэнтрабежна-ударных млыноў пацвердзілі высновы, зробленыя ў тэарэтычнай частцы работы.

На падставе вывадаў і рэкамендацый тэарэтычнай і эксперыментальнай частак работы спраектавана і даследавана канструкцыя паскаральніка з адхіляючымі элементамі, аптымальная па энергаэфектыўнасці і зносаўстойлівасці. Праведзены яе доследна-прамысловыя выпрабаванні на ААТ «Русал-Баксітагорск» і ЗАТ «Урал-Амега». Дадзеная канструкцыя зацверджана ААТ «НВА Цэнтр» ў якасці асноўнай канструкцыі пры памоле матэрыялаў з цвёрдасцю па шкале Моаса 5 і вышэй.

РЕЗЮМЕ

Таболич Андрей Викторович

Измельчение высокоабразивных материалов в центробежно-ударных мельницах

Ключевые слова: мельница, удар, классификатор, скорость, ускоритель, мощность, энергоэффективность, энергоемкость, износ, испытания.

Объект исследования – ударно-центробежная мельница.

Целью диссертационной работы является поиск и научное обоснование новых технических решений по повышению энергоэффективности процесса помола, дисперсности конечного продукта и снижению абразивного износа в измельчителях центробежно-ударного принципа действия.

В настоящей работе проанализированы конструкции центробежно-ударных мельниц. Определены их достоинства и недостатки, способы повышения энергоэффективности и износостойкости. Проведен анализ работ по математическому моделированию движения материала в камере измельчения. Установлено, что наиболее перспективным способом является оптимизация конструктивных параметров ускорителя и угла установки элементов отбойной поверхности.

Теоретические исследования позволили создать модель движения частиц материала в межлопастном пространстве различных конструкций ускорителей центробежно-ударной мельницы, определить скорость и угол вылета частиц из ускорителя, оценить их влияние на энергоэффективность измельчения и абразивный износ.

Результаты экспериментального изучения процесса измельчения в различных конструкциях ускорителей центробежно-ударных мельниц подтвердили выводы, сделанные в теоретической части работы.

На основании выводов и рекомендаций теоретической и экспериментальной частей работы спроектирована и исследована конструкция ускорителя с отводящими элементами оптимальная по энергоэффективности и износостойкости. Проведены ее опытно-промышленные испытания на ОАО «Русал-Бокситогорск» и ЗАО «Урал-Омега». Данная конструкция утверждена ОАО «НПО Центр» в качестве основной конструкции при помоле материалов с твердостью по шкале Мооса 5 и выше.

SUMMARY

Tabolich Andrey Viktorovich

Grinding of highly abrasive materials in centrifugal impact mills

Key words: mill, impact, classifier, speed, accelerator, power, energy efficiency, energy consumption, wear, testing.

The object of the study is a centrifugal-impact mill.

The aim of the dissertation is a search and scientific justification of new technical solutions on improving the energy efficiency of the grinding process, as well as the final product dispersion and the abrasive wear reduction the dispersion of final product and the reduction of abrasive wear in the grinders of the centrifugal-impact principle of operation.

In this paper, various designs of centrifugal-impact mills are analyzed, as well as their advantages and disadvantages. Ways to increase energy efficiency and wear resistance are determined. The analysis of works on mathematical modeling of the material movement in the grinding chamber is carried out. It is established that the optimization of design parameters of the accelerator and the angle of installation bump surface elements

Theoretical studies made it possible to create a model for the movement of material particles in the interlobar space of various designs of centrifugal-impact mill accelerators, to determine the velocity and angle of particle emission from the accelerator, to evaluate their effect on energy efficiency of grinding and abrasive wear.

The results of an experimental study of the grinding process in various designs of accelerators of centrifugal-impact mills confirmed the conclusions made in the theoretical part of the work.

Based on the conclusion and recommendations of theoretical and experimental parts of the work, has been researched and designed a new open construction of the accelerator with diverting elements optimal with regard to energy efficiency and wear resistance. Its pilot-industrial tests were carried out at OJSC «Rusal-Boksitogorsk» and CJSC «Ural Omega». This design was approved OJSC «NPO Center» as the main construction when milling materials with Moh's hardness 5 and above.

Научное издание

Таболич Андрей Викторович

**ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ ВЫСОКОАБРАЗИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ
В ЦЕНТРОБЕЖНО-УДАРНЫХ МЕЛЬНИЦАХ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

по специальности 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (нефтехимические
и химические производства)

Ответственный за выпуск А. В. Таболич

Подписано в печать 10.05.2019. Формат 60×84 ¹/₁₆.

Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать ризографическая.

Усл. печ. л. 1,4. Уч.-изд. л. 1,0.

Тираж 60 экз. Заказ .

Издатель и полиграфическое исполнение:

УО «Белорусский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,

изготовителя, распространителя печатных изданий

№ 1/227 от 20.03.2014.

Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.