

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 621.926

БОРОВСКИЙ
Денис Николаевич

**ТОНКОЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ МАЛОТОННАЖНЫХ
ПРОИЗВОДСТВ В БЫСТРОХОДНЫХ ЦЕНТРОБЕЖНО-ШАРОВЫХ
МЕЛЬНИЦАХ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

Минск 2015

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

Научный руководитель: **Вайтхович П.Е.**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Машины и аппараты химических и силикатных производств» учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»

Официальные оппоненты: **Синиченко Л.А.**, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительно-дорожные и подъемно-транспортные машины и оборудование» ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет»;

Вилькоцкий А.И., кандидат технических наук, доцент кафедры «Процессы и аппараты химических производств» учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»

Оппонирующая организация – ОАО «Белгорхимпром»

Защита состоится 14 октября 2015 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) 327-62-17, электронная почта: root@bktu.unibel.by.

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

Авторизован разослать «31» августа 2015 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
доктор технических наук, доцент



А.Э. Лендинский

ВВЕДЕНИЕ

Процесс измельчения материалов широко распространен во многих отраслях промышленности и характеризуется высокой энергоемкостью. Поэтому актуальной задачей является снижение энергозатрат на его проведение за счет разработки новых и усовершенствования существующих помольных агрегатов. В то же время измельчение материалов остается, пожалуй, наименее изученной технологической операцией ввиду сложности физических процессов разрушения материалов. Повысить эффективность процесса измельчения можно за счет интенсификации движения измельчающих тел в рабочей камере, что может быть реализовано в быстроходных шаровых мельницах, к которым относятся центробежно-шаровые. Простота конструкции и организации замкнутого цикла работы, предопределяют преимущественную возможность использования центробежно-шаровых мельниц для тонкого помола. Экспериментальные исследования показали их высокую эффективность, низкую металлоемкость и энергопотребление по сравнению с наиболее распространенными измельчителями, в частности шаровыми мельницами. Однако анализ научных работ выявил отсутствие комплексного подхода к изучению механики движения мелющих тел, к определению оптимальных конструктивных и технологических параметров. В этой связи проведение теоретических и экспериментальных исследований, направленных на определение оптимальных конструктивных и технологических параметров вертикальной центробежно-шаровой мельницы, является актуальной задачей. Ее решение позволит внести значительный вклад в интенсификацию процесса помола, осуществляемого в данной мельнице. Реализации поставленной задачи посвящена данная научная работа.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами. Данная работа выполнялась в рамках госбюджетных тем ГБ 36-06 «Разработка, исследование и моделирование высокоэффективных машин и агрегатов» (БГТУ, № гос. регистрации 2006712, 2006 г.); ГБ 31-11 «Разработка, исследование высокоэффективных машин и агрегатов» (БГТУ, № гос. регистрации 20118361, 2011 г.); ГБ 11-06 «Регулирование процессов структурообразования в солевых дисперсных системах и новых эффективных методов переработки отечественного и зарубежного горно-химического сырья на различные формы удобрений с улучшенными физическими и агрохимическими свойствами» (БГТУ, № гос. регистрации 20112469, 2011 г.); ГБ 12-014 «Разработка теоретических основ тонкого и сверхтонкого измельчения минеральных вяжущих и пигментов в быстроходных центробежно-шаровых мельницах» (БГТУ, № гос. регистрации 20121548, 2012 г.).

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка научно обоснованной методики определения оптимальных конст-

ружественных и технологических параметров, обеспечивающих эффективный тонкий помол материалов в вертикальной центробежно-шаровой мельнице.

Для достижения поставленной цели необходимо:

1. На основании анализа литературных данных и технических характеристик промышленных агрегатов выявить наиболее перспективные направления совершенствования центробежно-шаровых мельниц для получения тонкодисперсных материалов и определить причины, сдерживающие их внедрение в производство.

2. Разработать методику расчета движения мелющих тел в вертикальной центробежно-шаровой мельнице в зависимости от ее конструктивных и технологических параметров.

3. Разработать конструкцию вертикальной центробежно-шаровой мельницы, которая будет обеспечивать оптимальную траекторию движения мелющих тел для наиболее эффективного измельчения.

4. Определить режимы работы мельницы и установить закономерности изменения эффективности измельчения от конструктивных и технологических параметров вертикальной центробежно-шаровой мельницы, которые позволят определить рациональные геометрические параметры основных деталей и узлов, линейную скорость ротора и корзины классификатора, степень загрузки, а также диаметр мелющих тел.

Объектом исследования является вертикальная центробежно-шаровая мельница с классификатором. Предмет исследования – процесс измельчения, осуществляемый в вертикальной центробежно-шаровой мельнице.

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке методики расчета траектории движения загрузки и установлении закономерности изменения эффективности измельчения в зависимости от конструктивных и технологических параметров вертикальной центробежно-шаровой мельницы, которые позволяют определить рациональные геометрические параметры основных деталей и узлов, линейную скорость ротора мельницы и корзины классификатора, степень загрузки, а также диаметр мелющих тел.

Положения, выносимые на защиту.

1. Физическая модель движения шаров и частиц измельчаемого материала с учетом их взаимодействия и ее математическое описание в виде дифференциальных уравнений, позволяющие определить характерные режимы движения загрузки, скорость шаров и частиц на выходе из ротора и его габаритные размеры.

2. Математическое описание траектории движения мелющих тел по статическому наклонному кольцу с последующим их ударным взаимодействием с находящимися из ротора шарами, позволяющее определить оптимальные геометрические соотношения мельницы, а также скорость и траекторию последующего движения шаров.

3. Метод и алгоритм расчета траектории движения мелющих тел и частиц измельчаемого материала с учетом обеспечения максимального времени и поверхности их контакта, позволяющий установить оптимальный скоростной режим ротора, обеспечивающий эффективное измельчение.

4. Закономерности изменения эффективности измельчения от конструктивных и технологических параметров центробежно-шаровой мельницы, позволившие установить рациональные геометрические параметры ее основных узлов, диаметр мелющих тел, степень загрузки.

Личный вклад соискателя ученой степени. Все результаты и положения, выносимые на защиту, получены автором лично. Соискателем проведен анализ энергоемкости способов измельчения материалов, а также работ, посвященных изучению центробежных мельниц. Совместно с научным руководителем он принимал непосредственное участие в постановке задач, разработке методик и проведении теоретических и экспериментальных исследований. Для осуществления последних им была спроектирована и изготовлена лабораторная вертикальная центробежно-шаровая мельница с классификатором, на которой проводилось изучение эффективности помола и влияния различных факторов на ее величину. Полученные результаты позволили определить рациональные конструктивных и технологические параметры вертикальной центробежно-шаровой мельницы, дать рекомендации по их проектированию, интенсификации процесса измельчения и снижению удельных энергозатрат на помол. В публикациях с соавторами вклад соискателя определяется в рамках излагаемых в диссертационной работе результатов. Автор осуществлял проектирование промышленных образцов новых конструкций мельниц, курировал их изготовление, принимал активное участие в их промышленных испытаниях.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов. Результаты исследований докладывались на следующих конференциях: международной научно-технической конференции «Новейшие достижения в области импортозамещения в химической промышленности и производстве строительных материалов» (Минск, 2009); Республиканской молодежной научно-технической конференции «Научные стремления – 2010» (Минск, 2010); VI Международной научно-практической конференции «Поглед върху световната наука – 2010» (София, 2010); VII Международной научно-практической конференции «Veda a vznik – 2010/2011» (Прага, 2010/2011); Международной научно-технической конференции «Новейшие достижения в области импортозамещения в химической промышленности и производстве строительных материалов» (Минск, 2012); Международной научно-технической конференции «Проблемы и инновационные решения в химической технологии» «ПИРХТ-2013» (Воронеж, 2013); Международной научно-технической конференции «Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии» (Минск, 2014); Международной научно-технической конференции «Машины и аппараты XXI века. Химия. Нефтехимия. Биотехнология» (Воронеж, 2014); 60-й научно-технической конференции студентов и магистрантов (Минск, 2009); 76-й, 77-й, 78-й, 79-й научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (Минск, 2012-2015).

Опубликование результатов диссертации. Основные результаты диссертационной работы изложены в 8 научных статьях, из которых 7 опублико-

ваны в журналах, рекомендованных ВАК, материалах и тезисах 19 конференций, 4 отчетах по НИР. Новизна технических решений подтверждена патентом (РБ №17520) и заявкой на получения патента (РБ № а20121478). Общий объем опубликованных материалов составляет 6,16 усл. печ. л.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка использованных источников и четырех приложений. Полный объем диссертации составляет 203 с., из них 104 иллюстрации занимают 48 с., 15 таблиц – 6 с., 6 приложений – 21 с., а для списка использованных источников, включающие соответственно 182 и 27 наименований на 17 с.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен анализ научно-технической литературы по измельчению материалов, который позволил установить причину разрушения материалов и затрачиваемую при этом работу на измельчение. Он позволил установить, что минимальным значением энергозатрат характеризуется раздавливающее и ударное воздействие мелющих тел на измельчаемый материал. Одновременно было установлено, что при тонком и сверхтонком помоле без истирающего воздействия, несмотря на его неэкономичность, обойтись пока невозможно. Поэтому процесс получения тонкодисперсных частиц обычно двухстадийный: на первой стадии используются машины раздавливающего и ударного, а на второй – агрегаты с обязательным присутствием истирающего действия. Наиболее распространенной конструкцией измельчителя для второй стадии является барабанная шаровая мельница, в которой реализуется комплексное воздействие: ударное и истирающее. Характерные недостатки этих мельниц – высокая энерго- и металлоемкость.

Одним из наиболее перспективных направлений повышения эффективности шарового измельчения является интенсификация движения измельчающих тел в рабочей камере и комплексное воздействие на измельчаемый материал, что можно осуществить в центробежно-шаровых мельницах. Простота конструкции и организации замкнутого цикла работы определяют преимущественную возможность использования этих мельниц для тонкого и сверхтонкого помола. Центробежно-шаровые мельницы представляются новыми агрегатами как с точки зрения практического использования, так и с позиции теоретического изучения. Поэтому исследования кинематики мелющих тел и материала можно считать начальным этапом в изучение этих агрегатов.

Принцип, положенный в основу этих агрегатов, заключается в изменении траектории движения мелющих тел и повышении скорости их движения. Традиционные тихоходные шаровые мельницы при этом превращаются в быстроходные. В центробежно-шаровых мельницах реализуется комплексное воздействие на материал, включающее раздирающее, удар и истирание. Причем за счет высоких скоростей и возрастающего влияния инерционных сил все эти эффекты многократно увеличиваются.

Из анализа работ по исследованию центробежно-шаровых мельниц видно, что объема накопленных знаний по данному типу центробежно-шаровых помольных агрегатов недостаточен. Исследователи данных мельниц представляли материал в виде сыпучей однородной среды и использовали для нахождения модели движения загрузки основные уравнения гидродинамики. В тоже время в центробежно-шаровых мельницах используются мелющие тела, размер которых в несколько раз превышает размер частиц готового продукта, поэтому их движение необходимо рассматривать как движение отдельных тел взаимодействующих между собой. Также необходимо оценить эффективность измельчения материалов, влияние технологических и геометрических параметров на процесс помола и энергозатраты при этом. Эти нерешенные проблемы свидетельствуют о необходимости проведения как теоретических, так и экспериментальных исследований вертикальных центробежно-шаровых мельниц.

Вторая глава посвящена теоретическому изучению механики движения мелющих тел и материала в вертикальной центробежно-шаровой мельнице. В данном помольном агрегате (рисунок 1) в зависимости от угловой скорости (линейной скорости, определяемой по внешнему радиусу) ротора и степени его заполнения можно выделить три режима работы:

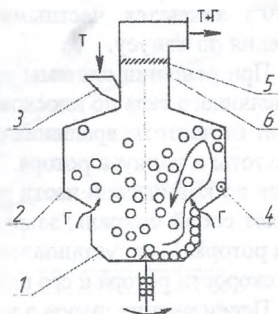
1) центрифугальный режим, когда мелющие тела двигаются исключительно только по ротору;

2) переходной режим – мелющие тела двигаются по ротору и кольцу;

3) циркуляционный режим – мелющие тела совершают циркуляционное движение по всему объему мельницы.

Ротор центробежно-шаровой мельницы (рисунок 1) состоит из плоского дна, конуса и цилиндроконической обечайки. Корпус в свою очередь – из нижнего конуса или кольца, цилиндрической обечайки, и верхнего конуса. В связи с этим было проанализированы траектории движения на отдельных участках ротора (плоский диск, конус, цилиндр), а также подъем мелющего тела после удара и его падение на ротор мельницы.

Теоретические исследования были начаты с анализа траектории движения одиночного мелющего тела по конической поверхности ротора. Расчетная схема модели движения представлена на рисунке 2. Для решения использовалась цилиндрическая система координат, которая при расчёте геометрических размеров ротора мельницы позволяет сразу определить координаты тела r и φ , характеризующие текущий радиус и угол поворота ротора. При этом принималось, что система координат подвижная и вращается с угловой скоростью ω ,



1 – ротор; 2 – корпус; 3 – загрузочная воронка; 4 – мелющее тело (шар); 5 – отбойная решетка; 6 – сепаратор
Рисунок 1. – Схема вертикальной центробежно-шаровой мельницы

равной угловой скорости ротора, а движение мелющего тела рассматривается относительно вращающейся конической поверхности.

Согласно расчетной схеме (рисунок 2) были составлены уравнения относительного движения в проекциях на оси координат для произвольной точки:

$$\begin{cases} m[r\dot{\varphi} + 2r\dot{\varphi}] = F_{a\varphi} + F_{e\varphi} + F_{k\varphi} \\ m[\dot{r}^2 - r(\dot{\varphi})^2] = F_{ar} + F_{er} + F_{kr} \\ m\ddot{z} = F_{az} \end{cases} \quad (1)$$

где m — масса мелющего тела, кг; $v_r = \dot{r}$, $v_\varphi = r\dot{\varphi}$, $v_z = \dot{z}$, \ddot{r} , $\ddot{\varphi}$, \ddot{z} — скорости (м/с) и ускорения тела (м/с²) по осям соответственно r , φ , z ; $F_{a\varphi}$, $F_{a\varphi}$, $F_{a\varphi}$, $F_{e\varphi}$, $F_{e\varphi}$, $F_{e\varphi}$, F_{kr} — проекции активных сил (сила тяжести и трения), переносной и кориолисовой сил инерции по осям соответственно r , φ , z ; N , r — текущий радиус тела, м.

Перемещения шара по плоскому дну ($\alpha = 0^\circ$) и вертикальной стенке ($\alpha = 90^\circ$) являются частными случаями движения по конусу.

При решении системы уравнений (1), была получена траектория движения мелющего тела по плоскому дну в виде спирали, угол закрутки которой зависит от частоты вращения ротора, а количество оборотов (витков) — от той же частоты и радиуса ротора. Также построена траектория движения мелющего тела по конической части ротора. Как и при движении по диску она представляет собой спираль, закрутка которой зависит от угловой скорости и радиуса ротора. Было установлено, что на высоту подъема можно влиять изменением скорости ротора и его радиуса.

Перемещение шаров в роторе центробежно-шаровой мельницы в какой-то мере упорядочено. Поэтому для учета взаимного влияния рассматривалось движение в виде цепочки шаров, рисунок 3.

При такой модели движения на шар, находящийся в произвольной точке ротора, будут действовать дополнительные силы: F_p — сила давления (подпор) других шаров; G_1 — сила тяжести столбика шаров; F_{1T} — сила трения между шарами, находящимися в соседних цепочках. Причем наиболее сложным по воздействию этих дополнительных сил является переходной конический участок. Согласно расчетной схеме (рисунок 4) с учетом дополнительных силовых факторов были получены уравнения относительного движения по конической поверхности (2).

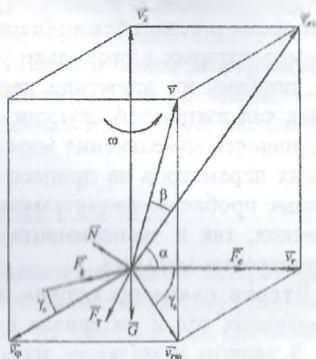


Рисунок 2. — Расчётная схема для движения мелющего тела по ротору

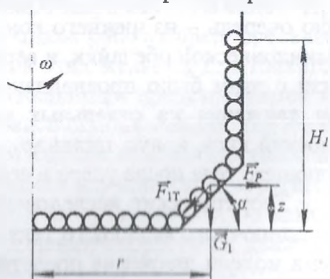


Рисунок 3. — Движение цепочки шаров в роторе

$$\begin{cases} m\dot{v}_x = F_e \cdot \sin \varphi + F_k \cdot \cos \gamma_1 - F_{Tx} - F_{1Tx}; \\ m\dot{v}_y = F_e \cdot \cos \varphi + F_k \cdot \sin \gamma_1 + (F_p \cdot \cos \alpha - G_1 \cdot \sin \alpha) \cdot \cos \alpha - F_{Ty} - F_{1Ty}; \\ m\dot{v}_z = -G + (F_p \cdot \cos \alpha - G_1 \cdot \sin \alpha) \cdot \sin \alpha - F_{Tz}. \end{cases} \quad (2)$$

Высота подъема как для материала, так и для мелющего тела при учете дополнительных усилий F_p , F_{1T} и G_1 при расчетах имела большее значение.

Это объясняется возникновением дополнительных воздействий, вызванных другими телами, а именно в большей степени силы подпора, которая с ростом угловой скорости увеличивается намного быстрее, чем сумма других сил. Тем самым происходило значительное увеличение высоты подъема.

Частицы материала, вследствие их скольжения по поверхности ротора, поднимаются на меньшую высоту, чем мелющие тела.

Отсюда можно сделать важный практический вывод, что высоту ротора следует принимать несколько меньше, чем максимальная высота подъема материала. Это обеспечит беспрепятственный его вылет из чаши ротора. Было установлено, что при уменьшении размера как частицы материала (рисунок 5), так и мелющего тела происходит увеличение максимальной высоты подъема. Таким образом частицы более плотно распределяются в роторе под действием инерционных сил, что обеспечивает их лучший контакт с мелющими телами. Адекватность полученной математической модели с учетом дополнительных усилий была экспериментально проверена на натурном образце. Результаты сравнения свидетельствуют о достаточно высокой точности расчета.

Следующим этапом являлось определение параметров движения элементов загрузки по наклонному статическому кольцу. Уравнения движения по кольцу согласно расчетной схеме (рисунок 6) принимают вид (3).

В результате расчетов было установлено, что перекатывающееся по поверхности кольца измельчающее тело (шар) перемещается в радиальном направлении на значительно большее расстояние, чем скользящая частица ма-

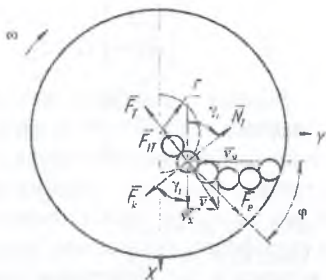


Рисунок 4. – Расчетная схема движение по поверхности ротора с учетом дополнительных сил

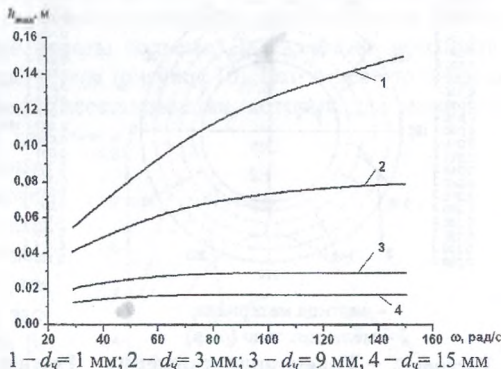


Рисунок 5. – Максимальная высота подъема частицы материала при $r_p = 0,1$ м

териала, а подъем по кольцу частицы материала и мелющего тела осуществляется по прямолинейной траектории, отклоненной от радиуса кольца примерно на 30° (рисунок 7).

$$\begin{cases} m(r\ddot{\phi} + 2\dot{r}\dot{\phi}) = -F_{Tr}, \\ m(\ddot{r} - r(\dot{\phi})^2) = -F_{T\phi}, \\ m\ddot{z} = -G - F_{Tz}. \end{cases} \quad (3)$$

Отличие в наклоне траекторий незначительное и составляет всего $3 - 6^\circ$ и обусловлено разностью величин коэффициентов трения, а следовательно, и сил трения, входящих в уравнения движения. После того как мелющее тело и частица материала достигает периферии кольца, оно соударяется со стенками корпуса и под действием силы тяжести скатывается с наклонного кольца вниз (рисунок 8). Уравнения для расчета при спуске с кольца аналогичны уравнениям (3), только в данном случае начальными условиями будут значения скоростей и координат после удара о стенку.

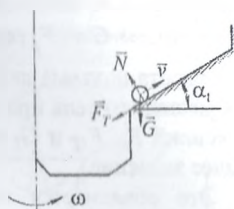
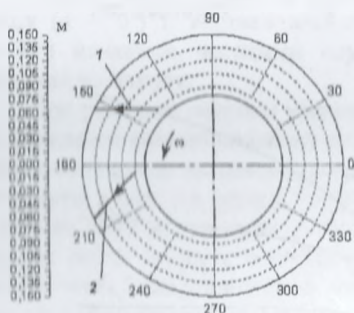
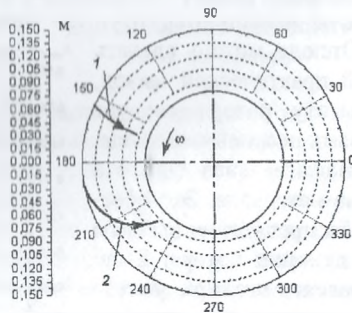


Рисунок 6. — Расчетная схема движения по кольцу



1 — частица материала;
2 — мелющее тело (шар)

Рисунок 7. — Траектория движения тел при подъеме по кольцу



1 — частица материала;
2 — мелющее тело (шар)

Рисунок 8. — Траектория движения тел при спуске с кольца

Расчет позволил получить значение внешнего диаметра кольца, а соответственно и корпуса мельницы, стенки которого должны обеспечить ограничение траектории движения мелющих тел таким образом, чтобы после свободного полета в сепарационной зоне их соприкосновение с ротором было как можно ближе к его центру. В этом случае будет достигаться наиболее равномерное распределение мелющих тел как по поверхности ротора, так и по всему объему мельницы, и, соответственно, максимально возможный их контакт с материалом, что приведет к повышению эффективности измельчения.

На следующем этапе, движение в сепарационной зоне, мелющие тела и материал соударяются вначале на участке «ротор-кольцо». Далее они поднимаются за счет ударного импульса вверх, где соударяются с наклонной стенкой корпуса мельницы и после этого возвращаются на盘面 ротора. Согласно

расчетной схемы (рисунок 9) были составлены уравнения движения на участке «ротор-кольцо» (4).

$$\begin{cases} m(r\ddot{\varphi} + 2\dot{r}\dot{\varphi}) = (F_y)_\varphi \\ m(\ddot{r} - r(\dot{\varphi})^2) = (F_y)_r \\ m\ddot{z} = -G + (F_y)_z \end{cases} \quad (4)$$

где $(F_y)_r$, $(F_y)_\varphi$, $(F_y)_z$ (Н) – проекции силы удара соответственно на оси r , φ , z .

Для учета всех возможных направлений силы удара для соударяющихся тел углы, определяющие направление линии соударения, принимались в наиболее вероятном диапазоне: $\alpha_2 = -10 - 70^\circ$; $\beta_1 = 10 - 75^\circ$.

По уравнениям (4) с учетом введенных ограничений была рассчитана максимально возможная высота подъема мелющего тела в зависимости от относительного диаметра D_k/d_p (D_k – диаметра корпуса или сменного кольца, м; d_p – диаметр ротора, м). При уменьшении угла β_1 (направление линии удара тела приближается к вертикали) и при отрицательных углах α_2 (дальнейшее движение тела происходит к оси вращения ротора), а также при увеличении линейной скорости ротора, наблюдается возрастание максимальной высоты подъема. Для измельчаемого материала она ниже, чем для мелющего тела (рисунок 10). Это в первую очередь связано с величиной коэффициента восстановления, который для материала почти в два раза меньше, чем для мелющих тел. Поэтому начальные скорости для материала приобретаемые на участке «ротор-кольцо», будут значительно меньше. В общем случае частицы материала движутся по криволинейной траектории, экстремум которой зависит от угла β_1 . Из условий максимального подъема частиц измельчаемого материала и наиболее вероятного угла β_1 (рисунок 10) было принято, что оптимальный относительный диаметр корпуса мельницы $D_k/d_p \leq 3,4$.

Максимальная высота подъема снижается и при уменьшении угла наклона образующей конической части корпуса θ_1 (рисунок 11), причем при наклоне более 30° влияние линейной скорости на подъем минимально (рисунок 12).

Для обеспечения возврата мелющего тела как можно ближе к центру ротора, необходимо чтобы происходил косой удар тела о наклонную поверхность корпуса.

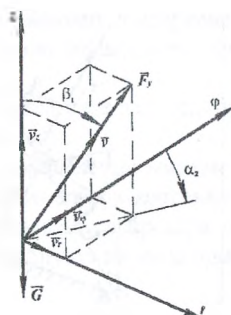


Рисунок 9. – Расчетная схема на участке «ротор-кольцо»



1 – $\beta_1 = 10^\circ$; 2 – $\beta_1 = 30^\circ$; 3 – $\beta_1 = 45^\circ$;
4 – $\beta_1 = 60^\circ$; 5 – $\beta_1 = 75^\circ$

Рисунок 10. – Высота подъема материала при $\alpha_2 = 10^\circ$ и $v_n = 8,71$ м/с

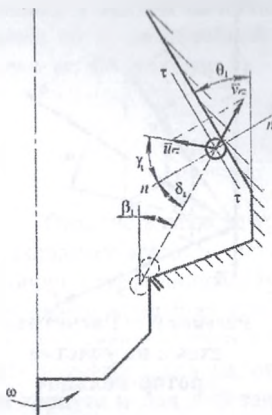
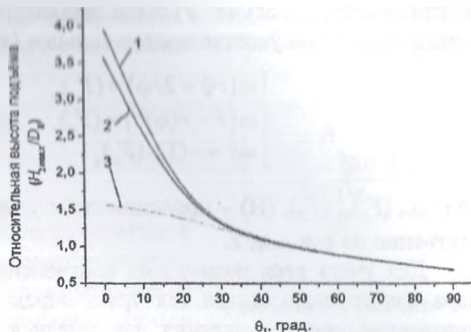


Рисунок 11. — Схема соударения тела со стенкой

При этом тело будет приближаться к оси ротора и в конечном итоге произойдет наиболее полное циркуляционное движение внутри мельницы.

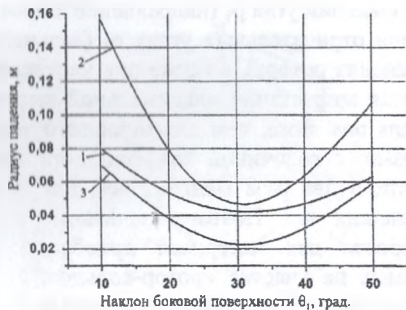
Это позволит обеспечить благоприятные условия для измельчения за счет минимального времени контакта с материалом. Наименьший радиус падения был получен при наклоне образующей боковой поверхности корпуса $\theta_1 = 25-35^\circ$ (рисунок 13).

С помощью инженерных программ было проанализировано изменение параметров движения мелких тел во времени. Расчеты проводились для ротора диаметром $d_p = 185$ мм при его угловой скорости $\omega = 90$ рад/с. По результатам этого анализа был построен график изменения высоты подъема тела диаметром 18 мм внутри мельницы с учетом воздействия других тел (рисунок 14). Исходя из положения центра тяжести тела по вертикали видно, что тело последовательно движется по следующей траектории: днище ротора — стенка ротора —



- 1 — $v_n = 8,71$ м/с ($n = 900$ об/мин);
 2 — $v_n = 5,81$ м/с ($n = 600$ об/мин);
 3 — $v_n = 2,91$ м/с ($n = 300$ об/мин)

Рисунок 12. — Зависимость относительной высоты подъема мелющего тела от угла θ_1 при $\beta_1 = 30^\circ$ и $\alpha_2 = 10^\circ$



- 1 — $v_n = 2,91$ м/с; 2 — $v_n = 5,81$ м/с; 3 — $v_n = 8,71$ м/с

Рисунок 13. — Зависимость радиуса падения тела от угла наклона боковой поверхности θ_1 при $\alpha_2 = 10^\circ$, $\beta_1 = 40^\circ$ и соотношении $D_n/d_p = 1,7$

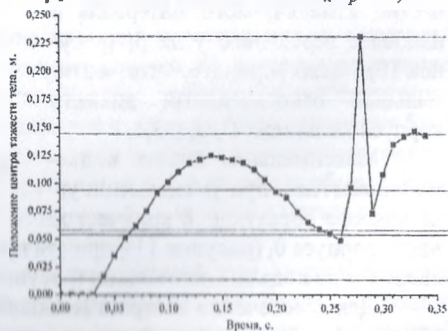


Рисунок 14. — Зависимость высоты подъема мелющего тела от времени

подъем по кольцу – спуск с кольца. Далее на 0,262 с происходит соударение тел, находящихся на роторе и скатывающихся с кольца, потом соударение с крыш-кой корпуса на 0,28 с и падение на край кольца 0,295 с.

Важным для мельницы с пневматической выгрузкой является недопущение провала твердой фазы в ее подроторное пространство.

С этой целью была разработана методика для определения минимально допустимой скорости воздушного потока v_a в кольцевом зазоре вертикальной центробежно-шаровой мельницы, при которой не наблюдается провала материала и обеспечивается равномерный вынос готового продукта из зоны помола.

Расчетная зависимость для нее имеет вид:

$$v_a = \sqrt{\frac{\pi \cdot \rho_1 \cdot l \cdot \cos^2 \beta_2}{2 \cdot r_p \cdot \rho_a} \cdot (\omega^2 \cdot r_p \cdot \cos \beta_2 + g \cdot \sin \beta_2)}. \quad (5)$$

где ρ_1 , ρ_a – плотности измельчаемого материала и воздушного потока соответственно, кг/м³; l – ширина кольцевого зазора, м; β_2 – угол наклона образующей кольцевого зазора, град.

На основе анализа движения загрузки разработана методика и алгоритм расчета мощности привода ротора мельницы. Затрачиваемая мощность как основной энергетический параметр состоит из трех составляющих: энергозатрат на придание вращения ротору с загрузкой, на преодоление трения загрузки о поверхность ротора и на придание ей кинетической энергии, достаточной для выброса в сепарационное пространство.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований процесса помола в вертикальной центробежно-шаровой мельнице. Для проведения экспериментальных исследований в качестве основного измельчаемого материала был выбран цементный клинкер с размером частиц 3÷5 мм. Помимо цементного клинкера также измельчались другие материалы: песок, глина, известняк, стеклобой, пигменты, иониты полимеризационного типа. В качестве мелющих тел использовались керамические шары диаметром 15÷24 мм и стальные – диаметром 2,8÷18 мм. Использовалась мельница с ротором диаметром $D = 185$ мм и высотой $H = 55$ мм, частота вращения которого изменялась в пределах 300÷900 об/мин. Измельчаемый материал подавался в зону помола непрерывно при помощи шнекового питателя, производительность которого составляла 8 кг/ч. Готовый продукт удалялся из помольной зоны воздушным потоком. Регулировка фракционного состава измельченного продукта проводилась при помощи классификатора, линейная скорость его корзины варьировалась в пределах от 0 до 8 м/с.

За основной критерий эффективности измельчения был принят остаток на сите R . Этот параметр определялся при помощи методики ситового анализа на рассеивающей машине фирмы Retsch AS 200 (Германия) с набором сит 20, 40, 80, 100 и 200 мкм и лазерного микроанализатора фирмы «Fritsch» с измерительным комплексом «Analysette 22». Кроме того, во всех сериях опытов дополнительно определялась удельная поверхность готового продукта на приборе ПСХ-8А.

Результаты экспериментов подтвердили предположения сделанные при

исследованиях режимов работы мельницы. В частности измельчения материала в центрифугальном режиме не наблюдалось, оно происходило только в переходном и циркуляционном режимах, в которых и проводились в дальнейшем все экспериментальные исследования.

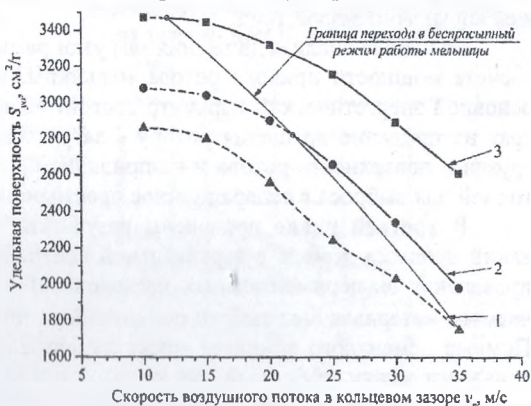
При помощи экспериментальных исследований было оценено влияние размера мелющих тел и степени заполнения ротора на качество помола. Установлено, что возрастание удельной поверхности материала наблюдается при увеличении степени заполнения ротора и при уменьшении размера мелющих тел, т.е. уменьшении объема пустот между ними. Для еще большего снижения объема пустот необходимо использовать комбинированную загрузку, при которой меньшие шары вписываются между большими. При этом соотношения для двух диаметров шаров должно составлять 1:0,732.

Подтверждена минимально допустимая скорость воздушного потока v_a в кольцевом зазоре (рисунок 15) и установлено, что при уменьшении ее расчетной величины появляется просыпь в подроторном пространстве.

Центробежно-шаровая мельница с пневматической выгрузкой измельченного материала предназначена прежде всего для работы в замкнутом цикле с классификатором. В связи с этим было проанализировано и оценено изменение фракционного состава готового продукта при помоле различных материалов в вертикальной центробежно-шаровой мельнице с классификатором. Результаты экспериментальных исследований для клинкера при различных линейных скоростях корзины классификатора v_k представлены на рисунке 16. При этом линейная скорость ротора составляла $v_r = 5,81$ м/с скорость воздушного потока в кольцевом зазоре — $v_a = 20$ м/с, диаметр мелющих тел — 6 и 12 мм при их массовом соотношении 1:0,732.

Как видно из графика (рисунок 16) доля фракции с размером частиц менее 40 мкм возрастает с увеличением линейной скорости корзины классификатора. При $v_k = 3,3$ м/с она составляет почти 40%. При этом уменьшается доля более крупной фракции (более 80 мкм), но для фракции 40 — 80 мкм она остается постоянной.

Дальнейшие исследования были направлены на поиск возможных путей промышленного использования центробежно-шаровых мельниц. В этой связи



1 — $v_r = 8,71$ м/с; 2 — $v_r = 5,81$ м/с; 3 — $v_r = 2,91$ м/с;
 - - - - наблюдается просыпь; — — просыпи нет.

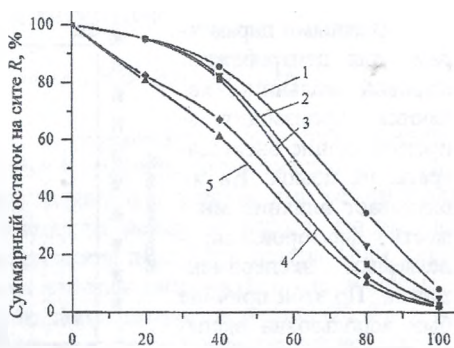
Рисунок 15. — Зависимость удельной поверхности измельченного клинкера $S_{уд}$ от скорости воздушного потока в кольцевом зазоре v_a при его ширине $l = 1,1$ мм

внимание было обращено на трудно измельчаемые материалы, содержащие SiO_2 (песок, бой стекла, сталеплавильный шлак).

Так, например, тонкодисперсный кварцевый песок необходим в производстве стекловолокна. В настоящее время его получают при помоле в ударно-центробежных мельницах, использование которых связано с большим абразивным износом.

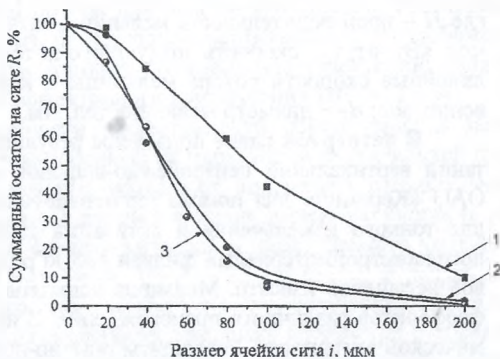
Поскольку в центробежно-шаровой мельнице совершенно другой способ разрушения, не связанный с высокими скоростями и сопровождаемым их абразивным износом, задача стояла в сравнении эффективности помола в этих двух агрегатах. Результаты этого сравнения приведены на рисунке 17 в виде характеристик крупности. Видно, что дисперсные составы готового продукта, полученного в центробежно-шаровой мельнице (кривая 2, рисунок 17) и в ударно-центробежной (кривая 3, рисунок 17) практически идентичны. Это свидетельствует о возможности использования центробежно-шаровых мельниц для помола кварцевого песка. Ресурс работы их при этом будет значительно больше. Хорошо измельчаются в центробежно-шаровых мельницах и другие материалы, содержащие SiO_2 .

Вторым практикоориентированным направлением являлось измельчение полимеризационных ионитов, начальный размер частиц которых составлял 1,3 мм. Характеристика крупности измельченного продукта, полученная с помощью лазерного микроанализатора «Fritsch», представлена на рисунке 18. По суммарной характеристике видно, что 80% частиц продукта имеет размер менее 100 мкм, причем 50% – менее 20 мкм. Такая дисперсность вполне удовлетворяет требованиям по дальнейшему использованию ионитов в качестве коагулянтов или флокулянтов.



1 – $v_k = 0$ м/с; 2 – $v_k = 1,3$ м/с; 3 – $v_k = 2,0$ м/с;
4 – $v_k = 2,6$ м/с; 5 – $v_k = 3,3$ м/с

Рисунок 16. – Фракционный состав измельченного клинкера в зависимости от скорости корзины классификатора



1 – $v_k = 6,0$ м/с; 2 – $v_k = 10,0$ м/с;
3 – по данным предприятия

Рисунок 17. – Фракционный состав измельченного песка при $v_k = 25$ м/с и $v_n = 5,81$ м/с

Важными параметрами для центробежно-шаровой мельницы являются производительность и общие энергозатраты на помол. На их оказывает влияние множество факторов, определяемых экспериментально. По этой причине был использован экспериментально-статистический метод оптимизации, реализованный в виде планирования эксперимента. В качестве

плана, для проведения многофакторного эксперимента по измельчению клинкера был выбран центральный композиционный ротатабельный план типа В_п.

После проведения проверок значимости и адекватности коэффициентов регрессии были получены окончательно уравнения:

$$\begin{aligned}
 \Pi &= 6,09 + 0,018 \cdot v_a \cdot v_n + 0,007 \cdot v_a \cdot v_k - 0,044 \cdot v_n \cdot d_T - \\
 &\quad - 0,008 \cdot v_a \cdot v_n \cdot d_T - 0,011 \cdot v_n \cdot v_k \cdot d_T; \\
 \Xi &= 181,034 - 2,33 \cdot v_a \cdot v_n + 1,882 \cdot v_a \cdot v_k - 1,464 \cdot v_n \cdot d_T + \\
 &\quad + 1,266 \cdot v_n \cdot v_k - 1,53 \cdot v_k \cdot d_T.
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

где Π – производительность мельницы, кг/ч; Ξ – общие энергозатраты на помол, кВт·ч/т; v_a – скорость воздушного потока в кольцевом зазоре, м/с; v_k, v_n – линейные скорости ротора мельницы и корзины классификатора соответственно, м/с; d_T – диаметр мелющих тел, мм.

В четвертой главе приведены результаты опытно-промышленных испытаний вертикальной центробежно-шаровой мельницы с классификатором на ОАО «Керамин» для помола пигментирующих веществ, на ОАО «Керамика» для тонкого измельчения и активации глинистого сырья и на ОАО «Красносельскстройматериалы» филиал №5 «Гродненский КСМ» для помола комовой негашеной извести. Мельница испытана и при измельчении низкосортных фосфоритов различного происхождения. В итоге достигнуто повышение их химической активности. Результаты опытно-промышленных испытаний в разных направлениях дали возможность разработать промышленный образец помольного агрегата. На ОАО «НПО «Центр» передана техническая документация на вертикальную центробежно-шаровую мельницу с воздушным классификатором производительностью 2 т/ч и максимальной потребляемой мощностью 45 кВт, согласно которой планируется изготовление и в дальнейшем внедрение помольных агрегатов для тонкого измельчения материалов на предприятиях Республики Беларусь и ближнего зарубежья.

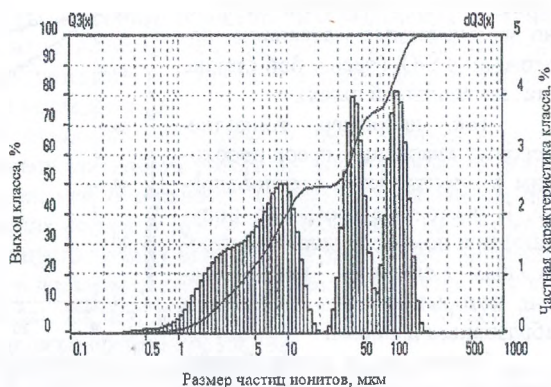


Рисунок 18. — Характеристика крупности ионов при $v_a = 20$ м/с, $v_n = 5$ м/с и $v_k = 5,5$ м/с

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработана физическая модель перемещения элементов загрузки в роторе центробежно-шаровой мельницы и получено ее математическое описание [1-А, 3-А, 12-А], позволяющее определить характерные режимы движения загрузки, скорость шаров и частиц на выходе из ротора, что дает возможность найти оптимальные геометрические параметры ротора. Определено, что для нахождения высоты подъема частицы материала, а следовательно и высоты ротора, необходимо учитывать дополнительные усилия (F_p , F_{IT} и G_I), возникающие в результате взаимодействия с другими элементами загрузки.

2. Получено математическое описание траектории движения мелющих тел по статическому наклонному кольцу с последующим их ударным взаимодействием с выходящими из ротора шарами, позволяющее определить оптимальные геометрические соотношения мельницы, а также скорость и траекторию послеударного движения шаров [2-А, 4-А, 11-А]. Установлено, что относительный диаметр корпуса мельницы, при котором частицы измельчаемого материала достигают максимальной высоты подъема, может меняться в пределах $D_K/d_p \leq 3,4$.

3. Разработана методика расчета траектории движения мелющих тел в вертикальной центробежно-шаровой мельнице в зависимости от ее конструктивных и технологических параметров [1-А – 4-А, 7-А, 11-А – 14-А, 17-А, 24-А], основанная на решении уравнений относительного движения тела по элементам мельницы с учетом влияния других тел и позволившая определить оптимальный скоростной режим ротора для помола материалов. Результаты дали возможность спроектировать конструкцию вертикальной центробежно-шаровой мельницы, которая обеспечивает оптимальную траекторию движения мелющих тел для наиболее эффективного измельчения [26-А, 27-А].

4. Установлены закономерности эффективности измельчения в зависимости от конструктивных и технологических параметров вертикальной центробежно-шаровой мельницы, которые позволяют определить рациональные геометрические параметры основных деталей и узлов, линейную скорость ротора и корзины классификатора, степень загрузки, а также диаметр мелющих тел [5-А, 6-А, 8-А – 10-А, 15-А, 16-А, 18-А – 23-А, 25-А]. В результате экспериментально подтверждено, что в мельнице могут осуществляться в зависимости от степени заполнения и скорости вращения ротора три режима ее работы. При 100%-ом заполнении ротора первый (центрифугальный) режим наблюдается при линейной скорости ротора менее 1,5 м/с. Второй (переходной) режим, когда мелющие шары и материал в большей степени двигаются по статическому кольцу корпуса мельницы, происходит при линейной скорости ротора 1,5 – 7,9 м/с. Третий (циркуляционный) режим, когда мелющие шары совершают циркуляционное движение внутри мельницы, наблюдается при линейной скорости ротора более 7,9 м/с. Для помола целесообразно при-

менять переходной и циркуляционный режим, так как измельчения в центрифугальном не происходит.

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Полученные результаты могут быть использованы при расчете, проектировании и эксплуатации вертикальных центробежно-шаровых мельниц для тонкого помола материалов средней и высокой прочности.

2. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили спроектировать конструкцию вертикальной центробежно-шаровой мельницы, на которой были проведены опытно-промышленные испытания на ОАО «Керамин» для помола пигментирующих веществ, ОАО «Керамика» для тонкого измельчения и активации глинистого сырья и на ОАО «Красносельскстройматериалы» филиал №5 «Гродненский КСМ» для помола комовой негашеной извести. Результаты опытно-промышленных испытаний в разных направлениях дали возможность разработать техническую документацию на вертикальную центробежно-шаровую мельницу с воздушным классификатором производительностью 2 т/ч для ОАО «НПО «Центр».

3. Разработанная конструкция вертикальной центробежно-шаровой мельницы может быть использована на предприятиях, где необходим сухой тонкий помол и механическая активация материалов. При этом для получения продукта с высокой дисперсностью в вертикальной центробежно-шаровой мельнице с классификатором необходимо выполнение следующих условий:

- линейная скорость ротора должна соответствовать ее минимальному значению для переходного режима работы мельницы, например для ротора диаметром 185 мм – 2,91 м/с;

- скорость воздушного потока которая определяется по формуле (5), должна обеспечивать беспросыпную работу мельницы;

- линейная скорость корзины классификатора должна быть такой, чтобы обеспечивать необходимую конечную фракцию в готовом продукте, например для клинкера ее величина составляет не менее 3,5 м/с;

- для уменьшения пустот между телами необходимо обязательно использовать комбинированную загрузку, например для четырех диаметров мелющих тел в соотношении – 1:0,732; 1:0,276; 1:0,138.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах, входящих в перечень ВАК

1–А. Боровский, Д. Н. Математическое моделирование движение мелющих тел на роторе вертикальной центробежной мельницы / Д. Н. Боровский, П. Е. Вайтехович, Д. В. Семененко // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорган. в-в. – 2009. – Вып. XVII. – С. 163–166.

2–А. Боровский, Д. Н. Ударное взаимодействие мелющих тел в сепарационной зоне центробежно-шаровой мельницы / Д. Н. Боровский // Вестник ПГУ. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2011. – №3. – С. 58–62.

3–А. Боровский, Д. Н. Учет размера измельчающих тел и их взаимодействия на движение в роторе центробежно-шаровой мельнице / Д. Н. Боровский, П. Е. Вайтехович // Химическая промышленность сегодня. – 2012. – №5. – С. 40–46.

4–А. Боровский, Д. Н. Движение измельчающих тел по статическому кольцу центробежно-шаровой мельницы / Д. Н. Боровский, П. Е. Вайтехович // Химическая промышленность сегодня. – 2012. – №6. – С. 50–56.

5–А. Вайтехович, П. Е. Интенсификация шарового измельчения в быстроходных мельницах / П. Е. Вайтехович, Д. В. Семененко, Д. Н. Боровский, В. И. Козловский // Химическая промышленность сегодня. – 2012. – №9. – С. 40–46.

6–А. Боровский, Д. Н. Измельчение материалов в вертикальной центробежно-шаровой мельнице с классификационной камерой / Д. Н. Боровский, П. Е. Вайтехович // Вестник ПГУ. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2013. – №3. – С. 135–138.

7–А. Вайтехович П. Е. Моделирование движения загрузки в быстроходных измельчающих агрегатах / П. Е. Вайтехович, В. С. Францкевич, П. С. Гребенчук, Д. Н. Боровский // Механика машин, механизмов и материалов. – 2014. – №4 (29). – С. 82–86.

Статьи в других журналах

8–А. Боровский, Д. Н. Влияние размера мелющих тел на эффективность помола в вертикальной центробежно-шаровой мельнице / Д. Н. Боровский, П. Е. Вайтехович // Строительная наука и техника. – 2013. – №1 (42). – С. 37–39.

Материалы конференций

9–А. Боровский, Д. Н. Исследование процесса измельчения в вертикальной центробежной мельнице / Д. Н. Боровский, В. В. Гурницкий // Сборник научных трудов 60 НТК студентов и магистрантов, Минск, 20–25 апреля 2009 г. / УО «БГТУ»; редкол.: Жарский И.М. [и др.]– Минск: БГТУ, 2009. – С. 93–97.

10–А. Боровский, Д. Н. Исследование процесса помола в центробежно-шаровой мельнице / Д. Н. Боровский, П. Е. Вайтехович, Д. В. Семененко // Новейшие достижения в области импортозамещения в химической промышленности и производстве строительных материалов: материалы МНТК, Минск, 25-27 ноября 2009 г.: в 2 ч. / УО «БГТУ»; редкол.: Жарский И.М. [и др.] – Минск: БГТУ, 2009. – С. 309–313.

11–А. Боровский, Д. Н. Математическая модель движение загрузки внутри центробежно-шаровой мельницы / Д. Н. Боровский // Республиканская молодежная научно-практическая конференция «Научные стремления – 2010», Минск, 1–3 ноября 2010 г. [Электронный ресурс] / НАН Беларуси. – Минск: Беларуская навука, 2010. – С. 365–367.

12–А. Боровский, Д. Н. Исследование движения элементов загрузки в центробежно-шаровой мельнице / Д. Н. Боровский, П. Е. Вайтехович // «Поглед върху световната наука – 2010»: материали за VI международна научна практична конференция. – София: «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2010. – Т.25. – С. 17–20.

13–А. Семененко, Д. В. Относительное движение мелющих тел в барабане планетарной мельницы / Д. В. Семененко, П. Е. Вайтехович, Д. Н. Боровский // Materialy VII Mezinarodni vedecko-prakticka konference «Veda a vznik – 2010/2011», Praha, 27 prosincu 2010 – 05 ledna 2011 roku / PublishingHouse «Education and Science»; Sefredaktor: Prof. JUDr Zdenek Cernak. – Praha, 2010/2011. – Dil 16. – С. 12–15.

14–А. Вайтехович, П. Е. Движение измельчающих тел в быстроходных шаровых мельницах / П. Е. Вайтехович, Д. В. Семененко, Д. Н. Боровский, П. С. Козлов // Новейшие достижения в области импортозамещения в химической промышленности и производстве строительных материалов: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 22–23 ноября 2012 г.: в 2 ч. / УО «БГТУ»; редкол.: И. М. Жарский [и др.]. – Минск, 2012. – Ч. 1. – С. 34–38.

15–А. Боровский, Д. Н. Помол полимеризационных ионитов в вертикальной центробежно-шаровой мельнице / Д. Н. Боровский, П. Е. Вайтехович // Новейшие достижения в области импортозамещения в химической промышленности и производстве строительных материалов: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 22–23 ноября 2012 г.: в 2 ч. / УО «БГТУ»; редкол.: И. М. Жарский [и др.]. – Минск, 2012. – Ч. 1. – С. 38–42.

16–А. Вайтехович, П. Е. Перспективы и пути развития шарового измельчения в химической промышленности / П. Е. Вайтехович, Д. В. Семененко, Д. Н. Боровский, В. И. Козловский // МНТК «Проблемы и инновационные решения в химической технологии» «ПИРХТ-2013», Воронеж, 1-3 октября 2013 г. / ФГБОУ ВПО «ВГУИТ». – Воронеж: ВГУИТ, 2013. – С. 232–234.

17–А. Вайтехович, П. Е. Моделирование как средство совершенствования измельчающих агрегатов / П. Е. Вайтехович, Д. В. Семененко, В. С. Францкевич, Д. Н. Боровский, // МНТК «Машины и аппараты XXI века. Химия. Нефтехимия. Биотехнология»: материалы интернет-конференции, Во-

ронеж, 30-31 октября 2014 г. / ФГБОУ ВПО «ВГУИТ». – Воронеж: ВГУИТ, 2014. – С. 24–27.

18–А. Боровский, Д. Н. Помол материалов органического и неорганического происхождения в вертикальной центробежно-шаровой мельнице / Д. Н. Боровский, П. Е. Вайтехович // Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 26–28 ноября 2014 г.: в 2 ч. / УО «БГТУ»; редкол.: И. М. Жарский [и др.]. – Минск, 2014. – Ч. 1. – С. 254–257.

19–А. Гарабажиу, А. А. Использование различных типов помольного оборудования для механохимической активации фосфатного сырья / А. А. Гарабажиу, А. Ф. Минаковский, Д. Н. Боровский // Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 26–28 ноября 2014 г.: в 2 ч. / УО «БГТУ»; редкол.: И. М. Жарский [и др.]. – Минск, 2014. – Ч. 1. – С. 262–265.

Тезисы докладов

20–А. Боровский, Д. Н. Тонкое измельчение материалов в вертикальной центробежно-шаровой мельнице / Д. Н. Боровский, П. Е. Вайтехович // Химическая технология и техника: тезисы 76-й НТК профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, Минск, 13-20 февраля 2012 г. [Электронный ресурс] / УО «БГТУ»; редкол.: Жарский И.М. [и др.]. – Минск: БГТУ, 2012. – С. 18.

21–А. Гарабажиу, А. А. Использование ударных и шаровых мельниц для помола стеклобоя / А. А. Гарабажиу, Д. Н. Боровский // Химическая технология и техника: тезисы 77-й НТК профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, Минск, 4–9 февраля 2013 г. [Электронный ресурс] / УО «БГТУ»; редкол.: Жарский И.М. [и др.]. – Минск: БГТУ, 2013. – С. 22.

22–А. Боровский, Д. Н. Модель упаковки мелющих тел и ее влияние на объем пустот в вертикальной центробежно-шаровой мельнице / Д. Н. Боровский, П. Е. Вайтехович, Францкевич В.С. // Химическая технология и техника: тезисы 77-й НТК профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, Минск, 4-9 февраля 2013 г. [Электронный ресурс] / УО «БГТУ»; редкол.: Жарский И.М. [и др.]. – Минск: БГТУ, 2013. – С. 23.

23–А. Гарабажиу, А. А. Использование измельчителей различного типа для исследования механической активации фосфаритов/ А. А. Гарабажиу, Д. Н. Боровский, А. Ф. Минаковский, В. И. Шатило // Химическая технология и техника: тезисы 78-й НТК профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 3-13 февраля 2014 г. [Электронный ресурс] / УО «БГТУ»; редкол.: Жарский И.М. [и др.]. – Минск: БГТУ, 2014. – С.45.

24–А. Боровский, Д. Н. Комплексная модель движения загрузки в вертикальной центробежно-шаровой мельнице/ Д. Н. Боровский, П. Е. Вайтехович //

Химическая технология и техника: тезисы 78-й НТК профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 3-13 февраля 2014 г. [Электронный ресурс] / УО «БГТУ»; редкол.: Жарский И.М. [и др.]. – Минск: БГТУ, 2014. – С.50.

25–А. Боровский, Д. Н. Определение пусковой мощности ротора вертикальной центробежно-шаровой мельницы / Д. Н. Боровский, П. Е. Вайтехович // Химическая технология и техника: тезисы 79-й НТК профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, Минск, 2-6 февраля 2015 г. [Электронный ресурс] / УО «БГТУ»; редкол.: Жарский И.М. [и др.]. – Минск: БГТУ, 2015. – С. 54.

Патенты и заявки на изобретения

26–А. Вертикальная ударно-центробежная мельница: пат. 17520 Респ. Беларусь, МПК7 В 02 С15/08, В 02 С 13/14 / Д. Н. Боровский, П. Е. Вайтехович; заявитель УО «Бел. гос. технологич. ун-т». – № а 20110255; заявл. 28.02.2011; опубл. 30.08.2013 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 8. – С. 22.

27–А. Заявка на изобретение № а20121478 Респ. Беларусь, МПК7 В 02 С. Вертикальная центробежно-шаровая мельница / Боровский Д. Н., Вайтехович П. Е., Гарабажиу А. А. // Афіцыйны бюлетэнь / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2014. – № 3. – С. 11.



Бароўскі Дзяніс Мікалаевіч

**Тонкае здрабненне матэрыялаў у хуткаходных
цэнтрабежна-шаравых млынах**

Ключавыя словы: млын, здрабненне, здрабняльнае цела, загрузка, рух, удар, сціранне, расцісканне, хуткасць, ротар, кальцо, зазор, дысперснасць, магутнасць, эфектыўнасць, энергаёмістасць, выпрабаванні.

Аб'ект даследаванняў – вертыкальны цэнтрабежна-шаравы млын з класіфікатарам.

Мэтай дысертацыйнай работы з'яўляецца распрацоўка навукова абгрунтаванай метадыкі вызначэння аптымальных канструктыўных і тэхналагічных параметраў, якія забяспечваюць эфектыўны тонкі памол матэрыялаў у вертыкальным цэнтрабежна-шаравым млыне.

У дадзенай рабоце прааналізаваны вынікі тэарэтычнага вывучэння працэсу памолу, спосабы павышэння яго эфектыўнасці і зніжэння энергаёмістасці. Вызначаны перавагі, недахопы і магчымасці інтэнсіфікацыі шаравога здрабнення матэрыялаў. У выніку гэтага ўсталявана, што адным з найболей перспектыўных напрамкаў павышэння эфектыўнасці шаравога здрабнення з'яўляецца інтэнсіфікацыя руху здрабняльных цел у рабочай камеры і комплекснае ўздзеянне на здрабляльны матэрыял, што можна ажыццявіць у цэнтрабежна-шаравых млынах. Тэарэтычныя даследаванні гэтага тыпу памольных агрэгатаў дазволілі ўстанавіць рэжымы іх работы, траекторыю руху, вышыню ўздыму і радыус падзення здрабняльных цел і матэрыялу, аптымальныя суадносіны геаметрычных параметраў млына.

Вынікі эксперыментальнага вывучэння працэсу памолу пацвердзілі вывады, зробленыя ў тэарэтычнай частцы работы, і далі магчымасць ацаніць уплыў тэхналагічных і геаметрычных параметраў на працэс памолу і энергавыдаткі пры гэтым.

На падставе вывадаў і рэкамендацый тэарэтычнай і эксперыментальнай частак работы спраектавана канструкцыя вертыкальнага цэнтрабежна-шаравога млына з класіфікатарам, на якой праведзеныя доследна-прамысловыя выпрабаванні на ААТ «Керамін» для памолу пігментных рэчываў, ААТ «Кераміка» для тонкага здрабнення гліністай сыравіны і ААТ «Краснасельскбудматэрыялы» філіял №5 "Гродзенскі КСМ» для памолу комавай негашанай валны.

РЕЗЮМЕ

Боровский Денис Николаевич

Тонкое измельчение материалов в быстроходных центробежно-шаровых мельницах

Ключевые слова: мельница, измельчение, мелющее тело, загрузка, движение, удар, истирание, раздавливание, скорость, ротор, кольцо, зазор, дисперсность, мощность, эффективность, энергоёмкость, испытания.

Объект исследования – вертикальная центробежно-шаровая мельница с классификатором.

Целью диссертационной работы является разработка научно обоснованной методики определения оптимальных конструктивных и технологических параметров, обеспечивающих эффективный тонкий помол материалов в вертикальной центробежно-шаровой мельнице.

В настоящей работе проанализированы результаты теоретического изучения процесса помола, способы повышения его эффективности и снижения энергоёмкости. Определены достоинства, недостатки и возможности интенсификации шарового измельчения материалов. В результате этого установлено, что одним из наиболее перспективных направлений повышения эффективности шарового измельчения является интенсификация движения измельчающих тел в рабочей камере и комплексное воздействие на измельчаемый материал, что можно осуществить в центробежно-шаровых мельницах. Теоретические исследования этого типа помольных агрегатов позволили установить режимы их работы, траекторию движения, высоту подъема и радиус падения мелющих тел и материала, оптимальное соотношение геометрических параметров мельницы.

Результаты экспериментального изучения процесса помола подтвердили выводы, сделанные в теоретической части работы, и дали возможность оценить влияние технологических и геометрических параметров на процесс помола и энергозатраты при этом.

На основании выводов и рекомендаций теоретической и экспериментальной части работы спроектирована конструкция вертикальной центробежно-шаровой мельницы с классификатором, на которой проведены опытно-промышленные испытания на ОАО «Керамин» для помола пигментирующих веществ, ОАО «Керамика» для тонкого измельчения глинистого сырья и ОАО «Красносельскстройматериалы» филиал №5 «Гродненский КСМ» для помола комовой негашеной извести.

SUMMARY

Borovskiy Denis Nikolaevich

Fine grinding of materials in high-speed centrifugal ball mills

Key words: mill, crushing, grinding, movement, impact, abrasion, pressing, speed, rotor, gap, dispersion, power, efficiency, power consumption, test.

Object of research – vertical centrifugal ball mill with classifier.

The purpose of dissertational work is the development of science-based methodology for determining the optimum constructive and technological parameters to ensure an effective fine grinding materials in the vertical centrifugal ball mill.

In the present work analyzed the results of a theoretical study of the grinding process, ways to improve its efficiency and reduce energy consumption. Determination of strengths, weaknesses and opportunities for intensification ball grinding materials. As a result, it found that one of the most promising ways of increasing the efficiency of ball grinding is the intensification of the movement of the grinding bodies in the working chamber and the combined effect of the ground material that can be carried out in a centrifugal ball mills. Theoretical research of this type of grinding units have established their modes of operation, the motion path, lifting height and radius of the fall of grinding media and material, the optimal ratio of the geometric parameters of the mill.

The results of an experimental study of the grinding process confirmed the conclusions of the theoretical part of the work, and made it possible to assess the impact of technological and geometrical parameters on the grinding process and the energy consumption at the same time.

Based on the findings and recommendations of the theoretical and experimental part of engineered construction vertical centrifugal ball mill with classifier, which conducted pilot tests at JSC «Keramin» grinding pigmentsing substances, JSC «Keramika» for fine grinding of the raw clay and JSC "Krasnoselskstroimaterialy" branch №5 «Grodzensky KSM" grinding lump quicklime.

Научное издание

Боровский Денис Николаевич

**ТОНКОЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ МАЛОТОННАЖНЫХ
ПРОИЗВОДСТВ В БЫСТРОХОДНЫХ ЦЕНТРОБЕЖНО-ШАРОВЫХ
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 Д. Н. Боровский

Подписано в печать 09.07.2015. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 1,5. Уч.-изд. л. 1,5.
Тираж 60 экз. Заказ 316.

Издатель и полиграфическое исполнение:
УО «Белорусский государственный технологический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/227 от 20.03.2014.
ЛП № 02330/12 от 30.12.2013.
Ул. Свердлова, 13а, 220006. г. Минск.