

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 621.926

СЕМЕНЕНКО
Дмитрий Владимирович

**ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛАНЕТАРНОЙ МЕЛЬНИЦЫ
НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

Минск 2013

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

Миллиновский Г.Н., доктор технических наук, генеральный директор государственного предприятия «Институт НИИСМ»

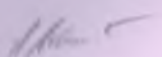
Оппонирующая организация **ОАО «Белгорхимпром»**

Защита состоится 12 декабря 2013 г. в 10.00 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@bstu/unibel.by.

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

Автореферат разослан «08» ноября 2013 г.

Учетный секретарь
совета по защите диссертаций
доктор технических наук, доцент



А.Э. Левданский

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. По мнению исследователей многих стран, одним из помольных агрегатов, пригодных для решения этой проблемы, является планетарная мельница. Экспериментальные исследования показали их высокую эффективность, низкую металлоемкость и энергопотребление по сравнению с наиболее распространенными измельчителями, в частности шаровыми мельницами. Однако анализ этих работ выявил отсутствие комплексного подхода к изучению механики движения мелющих тел, к определению рациональных конструктивных и технологических параметров. Именно это в дополнении с усложненной конструктивной схемой оказалось основным сдерживающим фактором на пути широкого внедрения планетарных мельниц в производство. В этой связи проведение комплекса теоретических и экспериментальных исследований, направленных на определение их рациональных конструктивных, кинематических и динамических параметров, является актуальной задачей. Ее решение позволит внести значительный вклад в интенсификацию процесса помола, осуществляемого в планетарных мельницах. Реализации поставленной задачи посвящена данная научная работа.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами, темами. Исследования, выполненные по теме диссертационной работы, проводились в рамках следующих госбюджетных тем: ГБ 25-047 «Исследование кинематических и динамических характеристик технологических машин с планетарным движением рабочего органа» (МО РБ, № госрегистрации 2005824, 2005 г.); ГБ 36-06 «Разработка, исследование и моделирование высокоэффективных машин и агрегатов» (БГТУ, № госрегистрации 2006712, 2006 г.); Г11М-067 «Теоретические основы процесса тонкого и сверхтонкого помола в измельчающих агрегатах планетарного типа» (БРФФИ, № госрегистрации 20114300, 2011 г.).

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является исследование влияния конструктивных и технологических параметров горизонтальной планетарной мельницы на эффективность процесса измельчения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать метод и алгоритм расчета высоты падения мелющих тел, позволяющий оценить их ударное воздействие на частицы измельчаемого материала в зависимости от конструктивных и технологических параметров планетарной мельницы.

2. Разработать физическую модель движения загрузки, учитывающую послыйный сдвиг коаксиально расположенных рядов мелющих тел, и метод определения силы давления на плоскость их смещения, позволяющий получить аналитические зависимости для расчета этой силы, нормальной реакции связи и граничных угловых скоростей с учетом взаимодействия шаров, их размера и местонахождения в помольном барабане, способа передачи вращения барабанам, конструктивных и технологических параметров планетарной мельницы.

3. Разработать метод построения границ помольных зон, позволяющий определить влияние конструктивных и технологических параметров планетарной мельницы на характер движения и распределения в барабане мелющих тел, выдать рекомендации по интенсификации процесса измельчения, в зависимости от вида разрушающего воздействия этих тел на материал и способа обкатки барабанов.

4. Установить закономерности изменения эффективности измельчения от конструктивных и технологических параметров планетарной мельницы, которые позволят определить для водопадного и центрифугального режимов работы рациональные геометрические параметры основных деталей и узлов, способ обкатки барабанов, их угловую скорость и степень загрузки, соотношение объемов материала и мелющих тел, а также диаметр этих тел.

Объектом исследования является планетарная мельница с горизонтальным расположением барабанов. Предмет исследования — процесс измельчения, осуществляемый в планетарной мельнице.

Положения, выносимые на защиту.

1. Метод и алгоритм расчета высоты падения мелющих тел, основанный на совместном решении уравнений траектории их свободного полета и окружности барабана, позволивший оценить ударное воздействие на частицы измельчаемого материала в зависимости от конструктивных и технологических параметров планетарной мельницы.

2. Физическая модель движения загрузки, учитывающая послыйный сдвиг коаксиально расположенных рядов мелющих тел, и метод определения силы давления на плоскость их смещения, позволивший получить аналитические зависимости для расчета этой силы, нормальной реакции связи и граничных угловых скоростей с учетом взаимодействия шаров, их размера и местонахождения в помольном барабане, способа передачи вращения барабанам, конструктивных и технологических параметров планетарной мельницы.

3. Метод построения границ помольных зон, заключающийся в установлении для каждого элемента загрузки условий скольжения, отрыва и безотрывного движения с учетом взаимного воздействия мелющих тел, позволивший определить влияние конструктивных и технологических параметров планетарной мельницы на характер движения и распределения в барабане мелющих тел, выдать рекомендации по интенсификации процесса измельчения, в зависимости от вида разрушающего воздействия этих тел на материал и способа обкатки барабанов.

4. Закономерности изменения эффективности измельчения от конструктивных и технологических параметров планетарной мельницы, позволившие установить для водопадного и центрифугального режимов работы рациональные геометрические параметры основных деталей и узлов, способ обкатки барабанов, их угловую скорость и степень загрузки, соотношение объемов материала и мелющих тел, а также диаметр этих тел.

Личный вклад соискателя. Все результаты и положения, выносимые на защиту, получены автором лично. Соискателем проведен анализ энергоемкости способов измельчения материалов, а также работ, посвященных изучению планетарных 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 планетарная мельница, на которой проводилось изучение эффективности помола и влияния различных факторов на ее величину. Полученные результаты позволили определить рациональные конструктивных и технологические параметры планетарных мельниц, 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.

Апробация результатов диссертации. Результаты исследований докладывались на следующих конференциях: Международная научно-техническая конференция «Интерстроймех-2002», Могилев, 2002; Международная научно-техническая конференция «Новые технологии в химической промышленности», Минск, 2002; Международная научно-технической конференция «Центробежная техника – высокие технологии», Минск, 2003; Международная научно-технической конференция «Центробежная техника – высокие технологии 2», Минск, 2005; II Международная научно-практическая конференция «Наука и технологии: шаг в будущее – 2007», Днепропетровск, 2007; IV Международная научно-практическая конференция «Дни науки-2008», София, 2008; Международная научно-техническая конференция «Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии», Минск, 2008; V Международной научно-практической конференции «Перспективные разработки науки и техники – 2009», Пржемысл, 2009; VII Международной научно-практической конференции «Наука и образование – 2010/2011», Прага, 2010/2011; VIII Международной научно-практической конференции «Новости передовой науки – 2012», София, 2012; VIII Международной научно-практической конференции «Новости научной мысли – 2012», Прага, 2012; Международная научно-техническая конференция «Новейшие достижения в области импортозамещения в химической промышленности и производстве строительных материалов», Минск, 2012.

Опубликованность результатов. Основные результаты диссертационной работы изложены в 17 научных статьях (5,95 авторского листа),

материалах 12 конференций. Новизна технических решений подтверждена двумя патентами РФ и тремя заявками на получение патента РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения и приложений. Общий объем диссертации 165 с., в т. ч. 77 иллюстрацию на 47 с., приложений на 11 с. и два списка использованных источников, включающие соответственно 133 и 34 наименований на 16 с.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен анализ энергоемкости процесса измельчения, который позволил установить, что минимальным ее значением характеризуется раздавливающее и ударное воздействие рабочего органа 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 совершенствования технических показателей шаровых мельниц является придание помольным барабанам планетарного движения. Его развитие привело к появлению нового типа измельчителей – планетарных мельниц. Первые экспериментальные исследования показали их высокую эффективность по сравнению со многими другими конструкциями измельчителей при низкой металлоемкости. Однако планетарные мельницы не нашли широкого распространения в промышленности. Причиной сложившейся ситуации является не только техническая сложность организации непрерывного цикла работы, но и отсутствие методов расчета основных кинематических и динамических характеристик, а также рекомендаций по проектированию.

В работах, проведенных ранее, установлены основные режимы движения загрузки – каскадный, водопадный, центрифугальный, наиболее эффективными из которых являются два последних. Было доказано теоретически и подтверждено экспериментально, что загрузка в планетарной мельнице распределяется в виде сегмента, смещенного на некоторый угол относительно водила. Однако в теоретических исследованиях не в полной мере изучено движение одиночного мелющего тела. Причем во многих работах не учтено влияние силы тяжести на характер его перемещения в помольном барабане. Не установлены четкие границы режимов движения мелющих тел и не получены расчетные зависимости для их определения. Ни в одном из литературных источников не приводится информация об

изменении силовых факторов, действующих на измельчающее тело, за один полный цикл, соответствующий одному обороту водила. При изучении движения загрузки в целом большинство исследователей рассматривали ее либо как единое целое, либо в качестве распределенной массы, обладающей упругими и диссипативными свойствами. Никто так и не показал, как изменяются границы помольных зон за один полный цикл. Кроме того, при исследовании мелющей загрузки не учитывалось взаимное воздействие мелющих тел друг на друга.

Экспериментальные исследования планетарных мельниц не имеют логического завершения. В частности, не установлено в полном объеме влияние конструктивных параметров мельницы на движения мелющих тел и, как следствие, эффективность процесса измельчения. Данные по определению рациональных соотношений компонентов загрузки, степени заполнения помольных барабанов разрознены и часто противоречивы. Они приведены для разных материалов при отсутствии единых критериев оценки.

Все указанное выше свидетельствует о необходимости проведения как теоретических, так и экспериментальных исследований планетарных мельниц. Причем в качестве основного объекта исследования принята планетарная мельница с горизонтальным расположением помольных барабанов как наиболее перспективная для промышленного использования.

Вторая глава посвящена теоретическому изучению механики движения мелющих тел в планетарных мельницах, которые бывают с внешней и внутренней обкаткой барабанов относительно неподвижной кольцевой поверхности. Оно было начато с анализа движения одиночного мелющего тела. На рисунке 1 представлена расчетная схема планетарной мельницы. Мелющее тело участвует в сложном движении, состоящем из относительно в системе координат $AХУ$ и переносного – поступательного перемещения по окружности этой системы относительно неподвижной системы координат OX_0Y_0 . На мелющее тело, находящееся в произвольной точке B , действуют сила тяжести G , относительная сила инерции F_{BA}^{**} , переносная сила инерции F_A^{**} , нормальная реакция связи N , сила трения $F_T = fN$, где f – коэффициент трения скольжения.

Для взаимосвязи геометрических параметров мельницы и элементов ее привода было введено два геометрических критерия:

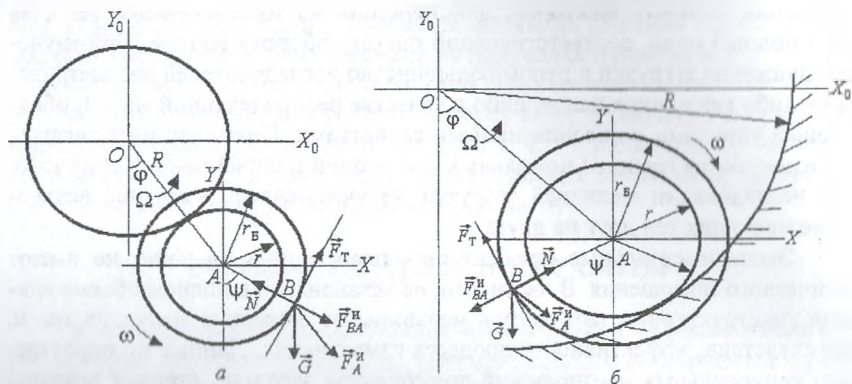
$$k = r_b / R; \quad b = r_T / r, \quad (1)$$

где r_b – внутренний радиус барабана, м; R – радиус неподвижной кольцевой поверхности, м; r_T – текущий радиус мелющего тела, м; r – радиус приводного элемента, м.

Связь углов поворота водила и барабана и соответствующих угловых скоростей устанавливается зависимостями:

$$\varphi = \psi \frac{k}{1 \pm k}; \quad \Omega = \omega \frac{k}{1 \pm k}, \quad (2)$$

где φ – угол поворота водила, рад; ψ – угол поворота барабана, рад; Ω – угловая скорость водила, рад/с; ω – угловая скорость барабана, рад/с.



a – внешняя обкатка барабанов; *б* – внутренняя обкатка барабанов
Рисунок 1 – Расчетная схема планетарной мельницы

В выражениях (2), а также в последующих формулах с символами «±» и «а±» верхний знак применим для планетарных мельниц с внешней, а нижний – с внутренней обкаткой барабанов.

Оценки силового воздействия на мелющее тело проводилась с использованием принципа Даламбера, согласно которому:

$$\vec{G} + \vec{F}_T + \vec{N} + \vec{F}_A^H + \vec{F}_B^H = 0. \quad (3)$$

Инерционные силы рассчитывались по формулам:

$$F_A^H = m\omega^2 k^2 R / (1 \pm k); \quad F_B^H = m\omega^2 k R b. \quad (4)$$

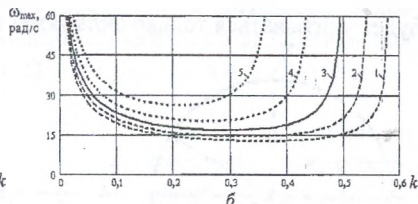
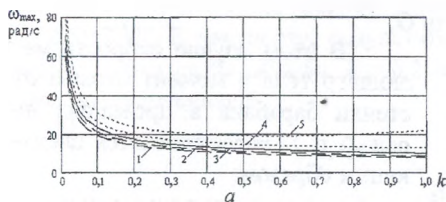
Так как все силы, входящие в уравнение (3), массовые, то было принято решение в дальнейших исследованиях и расчетах оперировать их относительными величинами (отнесенными к единице массы мелющего тела).

На первом этапе исследований определялись граничные угловые скорости перехода каскадного режима движения в водопадный, а последнего – в центрифугальный. Ориентируясь на средний из них – водопадный, эти угловые скорости барабана были названы соответственно минимальной ω_{\min} и максимальной ω_{\max} , при которых возможно существование этого режима:

$$\omega_{\min} = \sqrt{\frac{g(1 \pm k)}{kR \left[fb(1 \pm k) + fk \cos\left(\frac{\pi}{2 \pm 2k}\right) - k \sin\left(\frac{\pi}{2 \pm 2k}\right) \right]}} \quad (5)$$

$$\omega_{\max} = \sqrt{\frac{g(1 \pm k)}{kR [b(1 \pm k) - k]}}$$

Уравнения (5) благодаря наличию в них геометрического критерия *b*, связанного с текущим радиусом r_T расположения мелющих тел, позволяют определить граничные угловые скорости между режимами для любого слоя помольных тел загрузки. Комплекс расчетов, проведенных с использованием формул (5), показал, что параметры *k* и *b* оказывают значительное влияние на величину граничных скоростей (рисунок 2).



a – внешняя обкатка барабанов; b – внутренняя обкатка барабанов;
 1 – $b = 1,4$; 2 – $b = 1,2$; 3 – $b = 1,0$; 4 – $b = 0,8$; 5 – $b = 0,6$

Рисунок 2 – Зависимость максимальной угловой скорости для водопадного режима от геометрических критериев k и b

Следующим этапом теоретических исследований было определение условий отрыва мелющего тела от стенки барабана. Он возможен в том случае, если величина нормальной реакции связи не превышает нулевого значения. Выражение для ее определения имеет вид:

$$N_{\text{отн}} = \Omega^2 R(1 \pm k) \left[\frac{b(1 \pm k)}{k} + \cos(\psi \mp \varphi) \right] + g \cos(\psi) = 0. \quad (6)$$

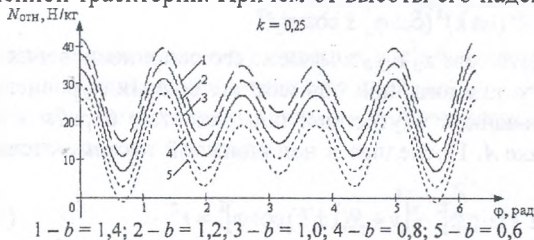
Для анализа изменения относительной реакции связи за один оборот водила, соответствующий полному циклу работы планетарной мельницы, в формуле (6) была проведена замена угла ψ на φ :

$$N_{\text{отн}} = \Omega^2 R(1 \pm k) \left[\frac{b(1 \pm k)}{k} + \cos\left(\frac{\varphi}{k}\right) \right] + g \cos\left(\frac{1 \pm k}{k} \varphi\right) = 0. \quad (7)$$

Комплекс расчетов, проведенный с использованием формулы (7), показал, что изменение относительной реакции носит циклический характер. При этом критерий b оказывает существенное влияние на ее величину. Также было установлено, что чем меньше k , тем выше цикличность изменения реакции связи. Для планетарной мельницы с радиусом внешней обкатки $R = 0,2$ м при $k = 0,25$, $\Omega = 4$ рад/с и $b = 0,6 \div 1,4$ полученные результаты показаны на рисунке 3.

После отрыва мелющее тело движется вниз по некоторой криволинейной траектории. Причем от высоты его падения зависит эффективность разрушения измельчаемого материала за счет ударного воздействия.

Если рассматривать движение мелющего тела (точка B), оторвавшегося от стенки барабана и падающего вниз в абсолютной системе координат OX_0Y_0 (рисунок 4), то в качестве активной силы



1 – $b = 1,4$; 2 – $b = 1,2$; 3 – $b = 1,0$; 4 – $b = 0,8$; 5 – $b = 0,6$

Рисунок 3 – Зависимость относительной реакции связи $N_{\text{отн}}$ от угла поворота водила φ и геометрического критерия b при внешней обкатке барабанов

будет учитываться только сила тяжести G .

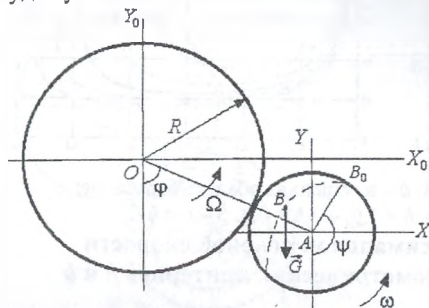


Рисунок 4 – Расчетная схема для определения высоты падения мелющего тела при внешней обкатке барабанов

В этом случае скорость мелющего тела в момент отрыва от стенки барабана в проекциях на оси X_0 и Y_0 рассчитывается следующим образом:

$$\begin{aligned} v_{B_0 X_0} &= v_A \cos \varphi \pm v_{BA} \cos \psi \\ v_{B_0 Y_0} &= v_A \sin \varphi + v_{BA} \sin \psi \end{aligned} \quad (8)$$

С учетом конструктивных и технологических параметров планетарной мельницы уравнения (8) примут вид:

$$\begin{aligned} v_{B_0 X_0} &= \Omega R(1 \pm k)(\cos \varphi_0 \pm \cos \psi_0) \\ v_{B_0 Y_0} &= \Omega R(1 \pm k)(\sin \varphi_0 + \sin \psi_0) \end{aligned} \quad (9)$$

Координаты падающего мелющего тела можно установить с помощью следующих уравнений:

$$\begin{aligned} x &= x_0 + v_{B_0 X_0} t \\ y &= y_0 + v_{B_0 Y_0} t - gt^2 / 2 \end{aligned} \quad (10)$$

где x_0 и y_0 – координаты мелющего тела в момент отрыва от стенки барабана в системе отсчета OX_0Y_0 , м; t – время падения мелющего тела, с.

$$\begin{aligned} x_0 &= R(1 \pm k) \sin \varphi_0 \pm r \sin \psi_0 \\ y_0 &= -R(1 \pm k) \cos \varphi_0 - r \cos \psi_0 \end{aligned} \quad (11)$$

С учетом выражений (9) и (11) уравнения движения мелющего тела в системе координат OX_0Y_0 будут иметь вид:

$$\begin{aligned} x &= R(1 \pm k) \sin \varphi_0 \pm r \sin \psi_0 + \Omega R(1 \pm k)(\cos \varphi_0 \pm \cos \psi_0) t \\ y &= -R(1 \pm k) \cos \varphi_0 - r \cos \psi_0 + \Omega R(1 \pm k)(\sin \varphi_0 + \sin \psi_0) t - gt^2 / 2 \end{aligned} \quad (12)$$

Уравнение траектории падающего мелющего тела:

$$y = -R(1 \pm k) \cos \varphi_0 - r \cos \psi_0 + \frac{(\sin \varphi_0 + \sin \psi_0)(x - R(1 \pm k) \sin \varphi_0 \mp r \sin \psi_0)}{(\cos \varphi_0 \pm \cos \psi_0)} - \frac{g(x - R(1 \pm k) \sin \varphi_0 \mp r \sin \psi_0)^2}{2\Omega^2 R^2 (1 \pm k)^2 (\cos \varphi_0 \pm \cos \psi_0)^2} \quad (13)$$

Координаты мелющего тела x_B и y_B в момент его соприкосновения со стенкой барабана можно установить при совместном решении уравнений (12) и окружности, образованной внутренней поверхностью барабана радиусом r с центром в точке A . Последнее в неподвижной системе отсчета OX_0Y_0 будет иметь вид:

$$[x - R(1 \pm k) \sin \varphi]^2 + [y + R(1 \pm k) \cos \varphi]^2 = r^2 \quad (14)$$

Результаты расчетов высоты падения $h = y_n - y_n$ показали, что ее величина существенно возрастает по мере повышения k . Кроме того, было установлено, что при одинаковом значении радиуса обкатки R она при внешней обкатке барабанов в 3-5 раз больше, чем при внутренней. При-

чем своего максимума высота падения достигает в диапазоне углов $\varphi = 220 \div 280^\circ$. В частности, результаты вычислений высоты падения при внешней обкатке барабанов, $R = 0,2$ м, $\Omega = 1,5$ рад/с и $k = 0,25 \div 1,0$ представлены на рисунке 5.

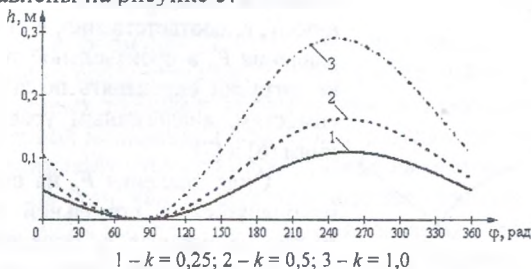


Рисунок 5 – Зависимость высоты падения мелющего тела h от угла поворота водила φ и геометрического критерия k

Важным силовым фактором, характеризующим истирающую способность каждого мелющего тела, является тангенциальная сила F_t , представляющая собой результирующую проекцию всех силовых факторов на касательную в точке B (рисунок 1). Выражение

для ее расчета имеет вид:

$$F_t^{\text{OTH}} = g \sin(\psi) + \Omega^2 R(1 \pm k) \sin(\psi \mp \varphi). \quad (15)$$

Результаты вычислений, проведенных с использованием этой формулы, показали, что за один полный оборот водила изменение величины и направления силы F_t носит циклический характер. При этом с ростом критерия k ее максимальное значение повышается, а количество циклов сокращается.

После изучения кинематических и динамических параметров одиночного мелющего тела дальнейшие исследования были направлены на определение взаимного влияния помольных тел друг на друга. Для этого было проанализировано относительное движение последних в подвижной системе координат AXY , которая вращается со скоростью ω , равной угловой скорости барабана. Для оценки воздействия рядом расположенных в помольной загрузке тел на перемещение каждого из них по отдельности в расчетную схему (рисунок 6) была введена дополнительная сила давления F_p со стороны других тел, имеющая радиальное направление. В этом случае уравнение относительного движения мелющего тела будет иметь вид:

$$m \bar{a}_d = \bar{G} + \bar{F}_T + \bar{F}_A^n + \bar{F}_{\text{ин}}^n + \bar{F}_c + \bar{F}_p, \quad (16)$$

где a_d – относительное ускорение, м/с^2 ; F_c – кориолисова сила инерции, Н.

Сила давления в какой-то произвольной i -й точке загрузки противоположно направлена и равна по модулю реакции связи $|F_{ip}| = |N_i|$, т. е. для некоторого i -го шара:

$$F_{ip} = \sum_{i=1}^n N_i, \quad (17)$$

где n – количество шаров, воздействующих на анализируемое.

При такой силовой схеме принята модель послынного сдвига коаксиально расположенных рядов мелющих тел (шаров). Дополнительный силовой фактор в этом случае представляет собой силу давления столбика шаров на

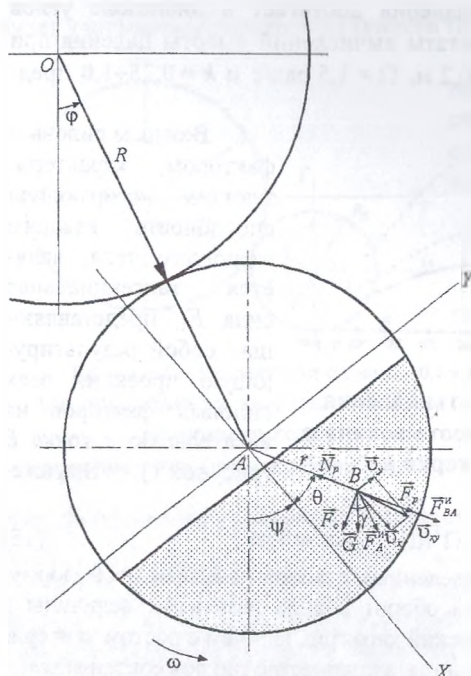


Рисунок 6 – Расчетная схема относительного движения мелющего тела в сегменте загрузки

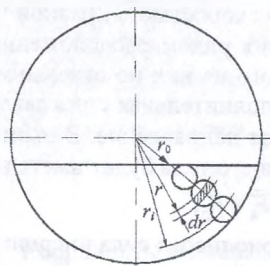


Рисунок 7 – Расчетная схема для определения силы давления

поверхности сдвига. Эта модель позволяет вернуться снова к системе координат, которая перемещается поступательно и реакцию N , а, соответственно, и силу давления F_p в произвольной точке загрузки определять по зависимостям, аналогичным уравнениям (6) и (7).

Сила давления F_p на шар, находящийся в помольной загрузке на радиусе r_i , определялась по расчетной схеме, представленной на рисунке 7. Ее для элементарного участка dr по ширине столбика шаров можно определить следующим образом:

$$dF_p = dm F_p^{\text{OTH}}, \quad (18)$$

где dm – масса элементарного участка, кг; F_p^{OTH} – относительная сила давления в пределах этого участка, Н/кг.

$$dm = j \rho dV = j \rho \delta dr dl, \quad (19)$$

где j – коэффициент заполнения столбика шарами, $j = V_w / V_k = \pi/6$; ρ – плотность материала, кг/м^3 ; dV – объем элементарного участка, м^3 ; dl – длина дуги ($dl = 2r_w$), м; δ – толщина одного слоя шаров ($\delta = 2r_w$), м; r_w – радиус шара, м.

После подстановки в уравнение (19) выражений для составляющих элементарной массы оно примет вид:

$$dm = 2\pi r_w^2 \rho dr / 3. \quad (20)$$

С учетом формул (18) и (20) сила давления на шар, находящийся на радиусе r_i :

$$F_{ip} = \frac{2}{3} \pi r_w^2 \rho \int_{r_i}^{r_0} F_p^{\text{OTH}} dr, \quad (21)$$

где r_0 – расстояние от центра барабана до свободной поверхности сегмента загрузки, м.

При расчете силы давления всех шаров на поверхность сдвига, в том числе и находящегося на радиусе r_i , верхний предел интегрирования следует принимать $r_i + r_w$. После интегрирования в указанных пределах с уче-

том того, что масса шара $m = 4\pi r_w^3 \rho / 3$, было получено уравнение для расчета относительной силы давления:

$$F_p^{\text{отн}} = N_p^{\text{отн}} = \frac{1}{2r_w} \left[\omega^2 \frac{(r_i + r_w)^2 - r_0^2}{2} + (r_i + r_w - r_0) \left(\frac{\omega^2 k^2 R^2}{1 \pm k} \cos(\psi \mp \varphi) + g \cos \psi \right) \right] \quad (22)$$

По формулам (22) и (6) был проведен комплекс расчетов нормальной реакции соответственно с учетом и без учета силы давления шаров при различных значениях конструктивных и технологических параметров планетарной мельницы. Полученные результаты показали, что сила давления F_p оказывает существенное влияние на величину нормальной реакции связи. При этом, чем дальше мелющее тело расположено относительно центра барабана и выше ω , тем сильнее проявляется эта зависимость.

С учетом силы F_p были проанализированы условия отрыва мелющих тел от стенки барабана, а также подъема на угол $\psi > \pi/2$. Было установлено, что выражение для расчета второй критической скорости не изменится, а для первой оно примет следующий вид:

$$\omega_{\min} = \sqrt{\frac{4gr_w(1 \pm k)}{f((r_i + r_w)^2 - r_0^2)(1 \pm k) \pm k^2 R(2f(r_i + r_w - r_0)\sin(\varphi) - 4r_w \cos(\varphi))}} \quad (23)$$

Результаты вычислений показали, что величина ω_{\min} , рассчитанная по зависимости (23) получается меньше, установленной с использованием формулы (5). Причем по мере повышения k и r_w отклонение между двумя расчетными значениями ω_{\min} увеличивается и может достигать нескольких десятков процентов.

Завершающим этапом теоретических исследований стало изучение движения мелющей загрузки с учетом взаимного воздействия помольных тел, конструктивных и технологических параметров горизонтальных планетарных мельниц. Находящиеся в ней мелющие тела могут быть прижаты к стенке помольной камеры или вышележащему слою шаров ($N_p > 0$ и $F_\tau \leq fN_p$), отрываться от нее ($N_p = 0$) или совершать межслойное движение ($N_p > 0$ и $F_\tau > fN_p$). Таким образом, они образуют три помольные зоны: безотрывного движения, скольжения (межслойного движения) и отрыва.

Для изучения характера изменения границ помольных зон был разработан специальный метод расчета. Его суть заключалась в том, что сначала для выбранных конструктивных параметров планетарной мельницы и степени загрузки ее барабанов определялся угол и площадь сегмента, заполненного мелющими телами. Далее в пределах последнего для каждого φ изменялся угол поворота барабана ψ (с интервалом, зависящим от диаметра мелющих тел) и путем варьирования величины текущего радиуса от $r_0 + r_w$ до $r_b - r_w$ с шагом $2r_w$ устанавливались значения r , при которых $N_p = 0$ и $F_\tau = fN_p$ (при $N_p > 0$). Затем по полученным r и ψ строились границы помольных зон.

Проведенный комплекс расчетов показал, что границы помольных зон в течение полного оборота водила постоянно изменяются. В частности, было установлено, что при водопадном режиме работы и внешней обкатке

барабанов повышение k приводит к сокращению зон отрыва и скольжения при одновременном росте размеров зоны безотрывного движения. В свою очередь, при водопадном режиме работы и внутренней обкатке барабанов увеличение геометрического критерия k от 0,1 до 0,25 приводит к сокращению размеров зон отрыва и скольжения при одновременном расширении зоны безотрывного движения мелющих тел. При дальнейшем повышении k от 0,25 до 0,4 наблюдается обратная закономерность. Например, изменение границ помольных зон для планетарной мельницы с внешней обкаткой барабанов, $R = 0,2$ м, $k = 0,5$, $b = 1$, $r_{ш} = 0,005$ м в восьми фиксированных положениях водила при $\Omega = 4$ рад/с показано на рисунке 8.



Рисунок 8 – Изменение границ помольных зон для планетарной мельницы с внешней обкаткой барабанов при $k = 0,5$ и $\Omega = 4$ рад/с

водила уже перестает зависеть от величины угловой скорости. В частности, для крайнего нижнего положения барабана при его внешней обкатке по неподвижной поверхности с радиусом $R = 0,2$ м и $k = 0,5$, $b = 1$, $r_{ш} = 0,005$ м границы помольных зон показаны на рисунке 9. При таких конструктивных параметрах планетарной мельницы вторая критическая скорость ω_{\max} соответствует $\Omega = 4$ рад/с.



Рисунок 9 – Изменение границ помольных зон при внешней обкатке барабанов и $k = 0,5$ в зависимости от угловой скорости водила Ω

Кроме того, было установлено, что при любых значениях k и Ω повышение величины критерия b будет приводить к увеличению размеров зоны безотрывного движения и сокращению других зон. При этом диаметр мелющих тел не оказывает влияния на характер изменения помольных зон. От него значительно зависят лишь размеры последних.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований процесса помола в специально сконструированной и изготовленной лабораторной планетарной мельнице со сменными барабанами диаметром 60÷120 мм и длиной 200 мм, в приводе которой использовались конические вариаторы с внутренней и внешней обкатками, что позволило изменять значение геометрических критериев k и b в широких пределах. В качестве основного размалываемого материала был выбран гипсовый камень (ГК) фракции 3÷5 мм, а дополнительных – клинкер (К) и стеклобой (С), твердость которых по шкале Мооса составляет 2, 3 и 6 единиц соответственно.

При экспериментальном изучении процесса помола в качестве критерия эффективности измельчения E была принята доля материала, прошедшего через сито с размером ячейки 100 мкм, которая определялась с помощью ситового анализа:

$$E = 100 - R_{100}, \quad (24)$$

где R_{100} – остаток на сите с размером ячейки 100 мкм, %.

В некоторых опытах с использованием метода воздухопроницаемости определялась удельная поверхность измельченного материала. Полученные экспериментальным путем данные подвергались статистической обработке методами регрессионного анализа.

Результаты исследований подтвердили выводы, сделанные на основании теоретического изучения планетарных мельниц. Так, при эксплуатации мельницы в водопадном режиме наилучшие результаты процесса помола достигаются при внешней обкатке барабанов, когда соотношение объемов мелющих тел и материала 3:1, степень заполнения барабанов $\epsilon = 38\div 50\%$, их угловая скорость $\omega = 1,2\omega_{\max}$, размер мелющих тел в 5,5÷6,5 раз меньше диаметра барабана. При этом размеры основных деталей и узлов планетарной мельницы должны быть такими, чтобы величина геометрического критерия k была близкой к единице, а $b \leq 0,8$.

Изучение процесса помола в водопадном режиме позволило установить, что за время обработки $t = 10$ мин эффективность не превышает 50%. Но даже эта величина свидетельствует о более высокой результативности измельчения в планетарных мельницах по сравнению с другими агрегатами. При этом водопадный режим характеризуется более низкими динамическими нагрузками и является перспективным для крупногабаритных мельниц.

Значительное повышение эффективности измельчения при эксплуатации в центрифугальном режиме можно проследить по кинетическим кривым, представленным на рисунке 10. На одной из них

видно, что уже через 4 мин обработки эффективность E достигает 100%. Здесь же четко прослеживается преимущество внутренней обкатки перед внешней и снижение величины E по мере увеличения твердости измельчаемого материала.

Результаты экспериментальных исследований центрифугального режима показали, что для достижения максимальной эффективности процесса помола необходимо поддерживать соотношение объемов

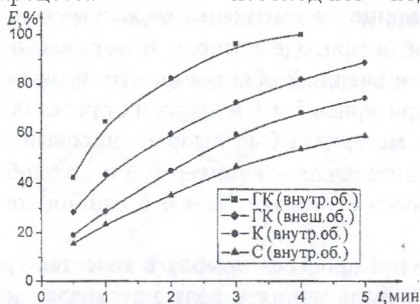


Рисунок 10 – Влияние времени помола t и твердости материала на эффективность помола

материала и мелющих тел в помольной камере 3:1, степень загрузки $\epsilon = 50\%$, а угловую скорость барабанов максимально возможной из условия прочности деталей и узлов планетарной мельницы. Кроме того, размер мелющих тел должен быть в 5÷6 раз меньше диаметра барабана, величина геометрического критерия $b \geq 1$, а $k \leq 0,2$. Также было установлено, что при рациональных геометрических

параметрах планетарной мельницы энергозатраты на помол гипсового камня до удельной поверхности $4970 \text{ см}^2/\text{г}$ не превышают $22 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$.
 Еще одним результатом экспериментальных исследований является установление того факта, что износ мелющих тел в помольных камерах планетарных и обычных барабанных мельниц примерно сопоставим и, в зависимости от угловой скорости барабанов и абразивности измельчаемого материала, составляет $0,7 \div 1,5 \text{ г}/\text{кг}$.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования позволили не только определить рациональные конструктивные и технологические параметры горизонтальных планетарных мельниц, но и в очередной раз подтвердить их преимущество по сравнению с обычными шаровыми.

В четвертой главе приведены результаты промышленных испытаний новой конструкции планетарной мельницы периодического действия с рациональными геометрическими параметрами, внедренной на РУП «Гродненский завод медицинских препаратов» в технологический процесс таблеточного производства с целью измельчения некондиционного продукта. Она позволила предприятию отказаться от утилизации дефектных медпрепаратов. Кроме того, в этой главе представлены результаты успешных промышленных и лабораторных испытаний планетарной мельницы при помоле сырьевых материалов, обладающих различными физико-механическими свойствами. Также были предложены направления и способы дальнейшего технического усовершенствования планетарных мельниц непрерывного действия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработаны метод и алгоритм расчета высоты падения мелющих тел [5-А, 20-А, 21-А], позволивший оценить их ударное воздействие на частицы измельчаемого материала в зависимости от конструктивных и технологических параметров планетарной мельницы, выдать рекомендации по интенсификации процесса измельчения при работе в водопадном режиме [2-А, 3-А, 4-А, 6-А, 7-А, 19-А, 22-А]. Результаты вычислений высоты падения показали, что ее величина существенно возрастает по мере повышения k . Кроме того, было установлено, что при одинаковом значении радиуса обкатки R она при внешней обкатке барабанов в 3÷5 раз больше, чем при внутренней.

2. Предложены физическая модель движения загрузки, учитывающая послойный сдвиг коаксиально расположенных рядов мелющих тел, и метод определения силы давления на плоскость их смещения, позволивший получить аналитические зависимости для расчета этой силы, нормальной реакции связи и граничных угловых скоростей с учетом взаимодействия шаров, их размера и местонахождения в помольном барабане, способа передачи вращения барабанам, конструктивных и технологических параметров планетарной мельницы [8-А, 9-А, 10-А, 23-А, 24-А]. Было установлено, что при вычислении первой граничной скорости и нормальной реакции связи с учетом и без учета силы давления рядом расположенных мелющих тел отклонение в величине рассчитанных параметров может достигать нескольких десятков процентов. Также было определено, что сила давления вышерасположенных в сегменте загрузки шаров не оказывает влияния на вторую граничную скорость [1-А, 18-А].

3. Разработан метод построения границ помольных зон, позволивший определить влияние конструктивных и технологических параметров планетарной мельницы на характер движения и распределения в барабане мелющих тел, выдать рекомендации по интенсификации процесса измельчения, в зависимости от вида разрушающего воздействия этих тел на материал и способа обкатки барабанов [11-А, 12-А, 25-А, 26-А]. Установлено, что границы помольных зон в течение полного оборота водила постоянно изменяются. Причем, если $\omega \geq 5\omega_{\max}$, то при внешней обкатке барабанов распределение границ помольных зон на протяжении полного оборота водила одинаковое во всех его положениях независимо от величины геометрического критерия k , а при внутренней обкатке их форма и размеры для каждого значения угла φ разные, но не зависят от угловой скорости барабанов.

4. Установлены закономерности изменения эффективности измельчения от конструктивных и технологических параметров планетарной мельницы, позволившие определить для водопадного и центрифугального

режимов работы рациональные геометрические параметры основных деталей и узлов, способ обкатки барабанов, их угловую скорость и степень загрузки, соотношение объемов материала и мелющих тел, а также диаметр этих тел [13–А, 14–А, 15–А, 16–А, 17–А, 27–А, 28–А, 29–А]. Выяснено, что максимальная эффективность процесса измельчения при одновременном обеспечении минимальных удельных энергозатрат достигается при центрифугальном режиме работы и внутренней обкатке барабанов, когда величина геометрического критерия $b \geq 1$, $k \leq 0,2$, соотношение объемов материала и мелющих тел в помольном барабане составляет 3:1, степень его загрузки 50%, размер шаров в 5÷6 раз меньше диаметра барабана, угловая скорость последнего – максимально возможная из условия прочности деталей и узлов планетарной мельницы.

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Полученные результаты могут быть использованы при расчете, проектировании и эксплуатации горизонтальных планетарных мельниц для тонкого и сверхтонкого помола материалов средней и высокой прочности в малотоннажных производствах.

2. При выборе режима работы планетарной мельницы следует руководствоваться требуемой тониной помола и допускаемыми динамическими нагрузками на ее детали. В процессах с высокой производительностью, требующих установки крупногабаритных агрегатов, но ограничивающихся тонким помолом, можно использовать водопадный режим. Для сверхтонкого помола следует отдавать предпочтение центрифугальному режиму и малогабаритным конструкциям мельниц.

3. Для эксплуатации планетарной мельницы в водопадном режиме необходимо использовать внешнюю обкатку барабанов. При этом соотношение объемов мелющих тел и измельчаемого материала должно составлять 3:1, степень заполнения барабанов $\epsilon = 38 \div 50\%$, размер шаров в 5,5÷6,5 раз меньше диаметра барабана, угловая скорость барабанов $\omega = 1,2\omega_{\max}$, величина геометрического критерия $k = 1$, а $b \leq 0,8$ [12–А, 13–А].

4. При центрифугальном режиме работы планетарной мельницы максимальной эффективности процесса помола можно достичь, используя внутреннюю обкатку барабанов, когда соотношение объемов материала и мелющих тел составляет 3:1, степень заполнения барабанов $\epsilon = 50\%$, размер шаров в 5÷6 раз меньше диаметра барабана, геометрический критерий $b \geq 1$, $k = 0,2 \div 0,25$, а угловая скорость барабанов – максимально возможная из условия прочности деталей и узлов мельницы [12–А, 13–А].

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО-ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах, входящих в перечень ВАК

1–А. Вайтехович, П. Е. Отрыв мелющих тел от поверхности барабана в планетарной мельнице с внешней обкаткой / П. Е. Вайтехович, Г. М. Хвесько, Д. В. Гапанюк, Д. В. Семененко // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорган. в-в. – 2003. – Вып. XI. – С. 188–194.

2–А. Вайтехович, П. Е. Условия отрыва шара от стенок барабана в планетарной мельнице с внутренней обкаткой / П. Е. Вайтехович, Д. В. Гапанюк, Д. В. Семененко // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорган. в-в. – 2002. – Вып. X. – С. 223–225.

3–А. Вайтехович, П. Е. Движение мелющих тел в планетарной мельнице с внутренней обкаткой / П. Е. Вайтехович, Д. В. Семененко // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2005. – № 1. – С. 39–43.

4–А. Вайтехович, П. Е. Влияние геометрических параметров привода на динамику планетарных мельниц с внутренней обкаткой / П. Е. Вайтехович, Д. В. Семененко // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2004. – № 7. – С. 6–8 (Vaitekhovich, P. E. Effect of Geometric Drive Parameters on Dynamics of Planetary Mills with Internal Rolling / P. E. Vaitekhovich, D. V. Semenenko // Chemical and Petroleum Engineering. – 2004. – Vol. 40, No. 7-8. – pp. 384–388).

5–А. Хвесько, Г. М. Исследование падения мелющего тела в планетарной мельнице с внешней обкаткой барабанов / Г. М. Хвесько, П. Е. Вайтехович, Д. В. Семененко // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2013. – № 2. – С. 24–25.

6–А. Вайтехович, П. Е. Анализ моделей относительного движения мелющих тел в планетарной мельнице / П. Е. Вайтехович, Д. В. Семененко, Г. М. Хвесько // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорган. в-в. – 2010. – Вып. XVIII. – С. 167–171.

7–А. Вайтехович, П. Е. Влияние взаимодействия между мелющими телами на характер их движения в планетарной мельнице / П. Е. Вайтехович, Д. В. Семененко // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2010. – № 9. – С. 13–15 (Vaitekhovich, P. E. Effect of interaction between milling bodies on the pattern of their movement in a planetary mill / P. E. Vaitekhovich, D. V. Semenenko // Chemical and Petroleum Engineering. – 2010. – Vol. 46, No. 9-10. – pp. 512–517).

8–А. Вайтехович, П. Е. Специфика движения мелющих тел в вертикальной планетарной мельнице / П. Е. Вайтехович, Д. В. Семененко, Д. В. Юхневич // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2009. – № 7. – С. 7–10 (Vaitekhovich, P. E. Motion Specifics of Grinding Bodies in Vertical Planetary Mills / P. E. Vaitekhovich, D. V. Semenenko, D. V. Yukhnevich // Chemical and Petroleum Engineering. – 2009. – Vol. 45, No. 7-8. – pp. 395–401).

9–А. Вайтехович, П. Е. Особенности движения мелющей загрузки в планетарных мельницах с внешней обкаткой / П. Е. Вайтехович, Д. В. Семененко // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2005. – № 7. – С. 7–8 (Vaitekhovich, P. E. Characteristic Features of the Movement of Grinding Charges in Planetary Mills with External Rolling / P. E. Vaitekhovich, D. V. Semenenko // Chemical and Petroleum Engineering. – 2005. – Vol. 41, No. 7-8. – pp. 360–362).

10–А. Вайтехович, П. Е. Особенности движения загрузки в планетарных мельницах с внутренней обкаткой / П. Е. Вайтехович, Д. В. Семененко // Теор. основы хим. технологии. – 2005. – Т. 39. – № 5. – С. 568–572 (Vaitekhovich, P. E. Specific Features of the Charge in Inner-Rolling Planetary Mills / P. E. Vaitekhovich, D. V. Semenenko // Theoretical Foundation of Chemical Engineering. – 2005. – Vol. 39, No. 5 – pp. 537–541).

11–А. Семененко, Д. В. Определение эффективности планетарных мельниц с внешней обкаткой / Д. В. Семененко, П. Е. Вайтехович // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорганических соединений. – 2005. – Вып. XIII. – С. 135–137.

12–А. Семененко, Д. В. Исследование эффективности измельчения в горизонтальных планетарных мельницах / Д. В. Семененко, П. Е. Вайтехович // Труды БГТУ. – 2011. – № 3(141): Химия и технология неорганических соединений. – С. 206–212.

13–А. Вайтехович, П. Е. Эффективность измельчения в горизонтальной планетарной мельнице / П. Е. Вайтехович, Д. В. Семененко // Химическая промышленность сегодня. – 2012. – № 8. – С. 49–53.

14–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.

Статьи в других журналах

15–А. Семененко, Д. В. Влияние вида обкатки помольных барабанов планетарных мельниц на основные динамические характеристики / Д. В. Семененко // Химическая промышленность. Сер. Процессы и аппараты химических производств. – 2004. – Т. 81. – № 3. – С. 126–129.

16–А. Вайтехович, П. Е. Влияние геометрических параметров привода на динамику планетарных мельниц с внешней обкаткой / П. Е. Вайтехович, Д. В. Семененко // Химическая промышленность. – 2005. – Т. 82. – № 1. – С. 36–39.

17–А. Вайтехович, П. Е. Технологические машины планетарного типа и перспективы их использования / П. Е. Вайтехович, Д. В. Семененко, Н. Н. Сидоров // Инженер-механик. – 2010. – № 1(46). – С. 19–22.

18–А. Вайтехович, П. Е. Анализ кинематических и динамических характеристик планетарных мельниц / П. Е. Вайтехович, Д. В. Гапанюк, Д. В. Семененко // *Интерстроймех – 2002: материалы Международной научно-технической конференции, Могилев, 23–24 мая 2002 г. / МГТУ; редкол.: И. С. Сазонов [и др.]*. – Могилев, 2002. – С. 322–323.

19–А. Вайтехович, П. Е. Планетарные мельницы – разработка исследование и перспективы использования / П. Е. Вайтехович, Д. В. Семененко // *Материалы международной научно-технической конференции: Новые технологии в химической промышленности, Минск, 20–22 ноября 2002 г. / Белорус. гос. технол. ун-т; редкол.: И. М. Жарский [и др.]*. – Минск, 2002. – С. 237–238.

20–А. Хвесько, Г. М. Методика определения высоты и времени падения мелющего тела в планетарной мельнице с внешней обкаткой барабанов / Г. М. Хвесько, П. Е. Вайтехович, Д. В. Семененко // *Материалы за VIII Международна научна практична конференция «Новината за напреднали наука – 2012», София, 17–25 мая 2012 г. / «БялГРАД-БГ» ООД; редкол.: М. Т. Петков*. – София, 2012. – Т. 25 – С. 36–38.

21–А. Хвесько, Г. М. Определение высоты и времени падения мелющего тела в планетарной мельнице с внутренней обкаткой барабанов / Г. М. Хвесько, Д. В. Семененко, П. Е. Вайтехович // *Materialy VIII Mezinarodni vedecko-prakticka konference «Zpravi vedecke ideje – 2012», Praha, 27 rjna – 05 listopadu 2012 roku / Publishing House «Education and Science»; Sefredaktor: Prof. JUDr Zdenek Cernak*. – Praha, 2012. – Dil 22. – С. 54–56.

22–А. Семененко, Д. В. Расчет основных характеристик планетарных мельниц / Д. В. Семененко, П. Е. Вайтехович // *Материалы международной научно-технической конференции: Центробежная техника – высокие технологии, Минск, 12–14 ноября 2003 г. / УП «НПО «Центр»; редкол.: В. В. Воробьев [и др.]*. – Минск, 2003. – С. 117–118.

23–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 / Publishing House «Education and Science»; Sefredaktor: Prof. JUDr Zdenek Cernak*. – Praha, 2010/2011. – Dil 16. – С. 12–15.

24–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.

25—А. Семененко, Д. В. Особенности движения мелющей загрузки в планетарных мельницах с горизонтальным расположением помольных барабанов / Д. В. Семененко, П. Е. Вайтехович, Д. В. Юхневич // *Материалы II Международной научно-практической конференции «Наука и технологии: шаг в будущее – 2007»*, Днепропетровск, 1–15 октября 2007 г. / «Наука та освіта»; редкол.: С. В. Скимов. – Днепропетровск, 2007. – Т. 5 – С. 72–73.

26—А. Семененко, Д. В. Влияние геометрических параметров привода на размеры и характер изменения помольных зон / Д. В. Семененко, П. Е. Вайтехович // *Materyaly V Miedzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Perspektywiczne opracowania sa nauka i technikami – 2009»*, Przemysl, 07–15 listopada 2009 roku / Sp. Z o.o. «Nauka i studia»; radaktor naczelna: Prof. Dr nab. Slawomir Gorniak. – Przemysl, 2009. – V. 10 – С. 25–28.

27—А. Семененко, Д. В. Исследование эффективности помола в планетарных мельницах / Д. В. Семененко, П. Е. Вайтехович // *Материалы международной научно-технической конференции: Центробежная техника – высокие технологии 2*, Минск, 27–29 сентября 2005 г. / УП «НПЮ «Центр»; редкол.: В. В. Воробьев [и др.]. – Минск, 2005. – С. 82–86.

28—А. Семененко, Д. В. Эффективность процесса помола в планетарных мельницах с горизонтальным расположением барабанов при водопадном режиме работы / Д. В. Семененко, П. Е. Вайтехович, Д. В. Юхневич // *Материалы IV Международной научно-практической конференции «Дни науки-2008»*, София, 1–15 апреля 2008 г. / ООД «БялГРАД-БГ»; редкол.: М.Т. Петков [и др.]. – София, 2008. – Т. 16 – С. 59–63.

29—А. Семененко, Д. В. Снижение энергоемкости процесса помола в планетарных мельницах / Д. В. Семененко, П. Е. Вайтехович // *Материалы Международной научно-технической конференции «Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии»*, Минск, 19–20 ноября 2008 г.: в 2 ч. / Белорус. гос. технол. ун-т; редкол.: И. М. Жарский [и др.]. – Минск, 2008. – Ч. 1 – С. 94–98.

Патенты и заявки на изобретения

30—А. Планетарная мельница: пат. № 9757 Респ. Беларусь, МПК7 В 02 С 17/00 / П. Е. Вайтехович, Д. В. Семененко; заявитель Белорус. гос. технол. ун-т. – № а 20050517; заявл. 26.05.05; опубл. 28.02.07 // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 5. – С. 68.*

31—А. Планетарная мельница: пат. № 11574 Респ. Беларусь, МПК7 В 02 С 17/00 / П. Е. Вайтехович, Д. В. Семененко; заявитель Белорус. гос. технол. ун-т. – № а20061366 заявл. 29.12.06; опубл. 28.02.09 // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 2. – С. 15.*

32—А. Планетарная мельница: заявка на изобретение № а20111207 Респ. Беларусь, МПК7 В 02 С 17/00 / Д. В. Семененко, Н. Н. Сидоров, А. А. Кирвель; заявитель Белорус. гос. технол. ун-т; заявл. 14.09.11 // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 2. – С. 13.*

33–А. Планетарная мельница: заявка на изобретение № а20111527
Респ. Беларусь, МПК7 В 02 С 17/00 / Д.В. Семененко, Н.Н. Сидоров;
заявитель Белорус. гос. технол. ун-т; заявл. 16.11.11 // Афіцыйны бюл. /
Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 3. – С. 13.

34–А. Планетарная мельница: заявка на изобретение № а20111528
Респ. Беларусь, МПК7 В 02 С 17/00 / Д.В. Семененко, Н.Н. Сидоров;
заявитель Белорус. гос. технол. ун-т; заявл. 16.11.11 // Афіцыйны бюл. /
Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 3. – С. 13.



Семяненка Дзмітрый Уладзіміравіч

**Інтэнсіфікацыя працэсу здрабнення ў гарызантальным
планетарным млыне**

Ключавыя словы: млын, здрабненне, здрабняльнае цела, загрузка, рух, удар, сціранне, расцісканне, хуткасць, барабан, вадзіла, прывад, перадача, магутнасць, эфектыўнасць, энергаёмістасць, выпрабаванні, укараненне.

Аб'ект даследаванняў – планетарны млын з гарызантальным размяшчэннем памольных барабанаў.

Мэтай дысертацыйнай работы з'яўляецца інтэнсіфікацыя працэсу здрабнення ў гарызантальных планетарных млынах на аснове даследавання механікі руху здрабняльных цел, вызначэння рацыянальных канструктыўных і тэхналагічных параметраў гэтага тыпу памольных агрэгатаў, а таксама выдача рэкамендацый па іх праектаванні і эфектыўнай эксплуатацыі.

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 ўстаноўлена, што павышэнне паказчыкаў працэсу памолу дасягаецца за кошт складанага руху памольных барабанаў, рэалізуемага ў планетарных млынах. Тэарэтычныя даследаванні гэтага тыпу памольных агрэгатаў дазволілі ўстанавіць з улікам узаемнага ўздзеяння здрабняльных цел межы рэжымаў руху здрабняльных цел, умовы іх адрыву ад паверхні барабана, траекторыю і вышыню падзення, прааналізаваць залежнасць іх расціскальнай і сціральнай здольнасці ад геаметрычных параметраў млына і яго прываду, вызначыць характар змянення памераў і межаў памольных зон на працягу поўнага абароту вадзіла. Вынікі эксперыментальнага вывучэння працэсу памолу пацвердзілі вывады, зробленыя ў тэарэтычнай частцы работы, і далі магчымасць устанавіць рацыянальныя канструктыўныя і тэхналагічныя параметры планетарнага млына.

На падставе вывадаў і рэкамендацый тэарэтычнай і эксперыментальнай частак работы спраектавана высокаэфектыўная канструкцыя планетарнага млына перыядычнага дзеяння, укаранёная на РУП «Гродзенскі завод медыцынскіх прэпаратаў» для здрабнення некандыцыйных лекавых прэпаратаў, якія атрымліваюцца ў вытворчым працэсе.

РЕЗЮМЕ

Семененко Дмитрий Владимирович

Интенсификация процесса измельчения в горизонтальной планетарной мельнице

Ключевые слова: мельница, измельчение, мелющее тело, загрузка, движение, удар, истирание, раздавливание, скорость, барабан, водило, привод, передача, мощность, эффективность, энергоемкость, испытания, внедрение.

Объект исследования – планетарная мельница с горизонтальным расположением барабанов.

Целью диссертационной работы является интенсификация процесса измельчения в горизонтальных планетарных мельницах на основе исследования механики движения мелющих тел, определения рациональных конструктивных и технологических параметров этого типа помольных агрегатов, а также выдача рекомендаций по их проектированию и эффективной эксплуатации.

В настоящей работе проанализированы результаты теоретического изучения процесса помола, способы повышения его эффективности и снижения энергоемкости. Определены достоинства, недостатки и возможности интенсификации шарового измельчения материалов. В результате этого установлено, что повышение показателей процесса помола достигается за счет сложного движения помольных барабанов, реализуемого в планетарных мельницах. Теоретические исследования этого типа помольных агрегатов позволили установить с учетом взаимного воздействия мелющих тел границы режимов движения мелющих тел, условие их отрыва от стенки барабана, траекторию и высоту падения, проанализировать зависимость их раздавливающей и истирающей способности от геометрических параметров мельницы и ее привода, определить характер изменения размеров и границ помольных зон в течение полного оборота водила. Результаты экспериментального изучения процесса помола подтвердили выводы, сделанные в теоретической части работы, и дали возможность установить рациональные конструктивные и технологические параметры планетарной мельницы.

На основании выводов и рекомендаций теоретической и экспериментальной части работы спроектирована высокоэффективная конструкция планетарной мельницы периодического действия, внедренная на РУП «Гродненский завод медицинских препаратов» для измельчения некондиционных твердых лекарственных препаратов, образующихся в производственном процессе.

SUMMARY

Semianenka Dzmitry Uladzimiravich

Intensification of process of crushing in a horizontal planetary mill

Key words: mills, crushing, crushing body, loading, movement, impact, grinding, pressing, speed, drum, drove, drive, transfer, capacity, efficiency, power consumption, tests, introduction.

Object of research — a planetary mill with a horizontal arrangement drums.

The purpose of dissertational work is the intensification of process of crushing in horizontal planetary mills on the basis of research of mechanics of movement of grinding bodies, definition of rational constructive and technological parametres of this type grinding units, and also delivery of recommendations about their designing and effective operation.

In the present work results of theoretical studying of process of a grinding, ways of increase of its efficiency and power consumption decrease are analysed. Advantages, lacks and possibilities of an intensification of spherical crushing of materials are defined. As a result of it was established, that increase of parameters of process of a grinding is reached due to complex movement the drums, sold in planetary mills. Theoretical researches of this type grinding units have allowed to establish borders of modes of movement of grinding bodies, their condition falling from a wall of a drum, a trajectory and height of falling, to analyse their dependence pressing and using up ability from geometrical parameters of a mill and its drive, to define character of change of the sizes and borders grinding zones during a full turn drove. Results of experimental studying of process of a grinding have confirmed the conclusions made in a theoretical part of work, and have enabled to establish rational geometrical and technological parameters of a planetary mill

On the basis of conclusions and recommendations of a theoretical and experimental part of work the highly effective design of a planetary mill of the periodic action, introduced on RUE «Grodno factory of medical preparations » for crushing the sub-standard firm medical products formed in production has been designed.

Научное издание

Семененко Дмитрий Владимирович

**ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛАНЕТАРНОЙ МЕЛЬНИЦЫ
НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ**

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. В. Семененко

Подписано в печать 05.11.2013. Формат 60×84 ¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 1,5. Уч.-изд. л. 1,5.
Тираж 60 экз. Заказ 460.

Издатель и полиграфическое исполнение:
УО «Белорусский государственный технологический университет».
ЛИ № 02330/0549423 от 08.04.2009.
ЛП № 02330/0150477 от 16.01.2009.
Ул. Свердлова, 13а, 220006. г. Минск.