

**ВАЙТЕХОВИЧ ПЕТР ЕВГЕНЬЕВИЧ**

**ПРОЦЕССЫ ЭФФЕКТИВНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В АГРЕГАТАХ  
С ИНЕРЦИОННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА РАЗРУШАЕМЫЙ  
МАТЕРИАЛ**

Специальность: 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы  
(химическая промышленность)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Москва 2011

*В свет  
Г.Рост  
В*

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет»

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Бобков Сергей Петрович

доктор технических наук, профессор  
Севастьянов Владимир Семенович

доктор технических наук, профессор  
Тиньков Олег Васильевич

Ведущая организация Тамбовский государственный технический  
университет, г. Тамбов

Защита состоится «15» сентября 2011 г. В 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.145.01 при Московском государственном университете инженерной экологии по адресу: г. Москва, ул. Старая Басманная, 21/4, ауд. имени Л.А. Костандова (Л1 – 207)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГУИЭ

Автореферат разослан

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к. т. н., доцент

С.А. Трифонов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

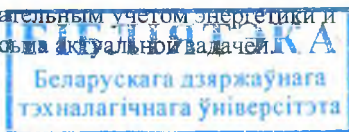
**Актуальность работы.** Процессы измельчения широко используются во многих отраслях промышленности, в том числе и химической. В настоящее время сложились основные тенденции в развитии помольного оборудования. В зависимости от скорости движения рабочих органов все мельницы можно разделить на тихоходные, средне- и быстроходные. Основным помольным агрегатом на отечественных предприятиях до сих пор остается барабанная шаровая мельница, являющаяся с точки зрения механики тихоходной машиной. Это металлоемкий агрегат с высокими энергозатратами на проведение процесса помола.

Анализ современного состояния технологии и техники дезинтеграции показывает, что указанные недостатки преодолимы при использовании в производстве средне- и быстроходных измельчителей. Они отличаются более высокими скоростями движения рабочих органов, а, соответственно, и измельчаемого материала. При этом возникают инерционные силы, существенно превышающие гравитационную и становящиеся основным силовым фактором разрушения материалов. В таких агрегатах значительно повышается интенсивность процесса диспергирования и требуемая производительность может быть достигнута при уменьшении рабочего объема. А это в свою очередь приводит к снижению металло- и энергоемкости измельчающих машин. Подобный эффект может быть достигнут и при использовании диспергаторов, принцип действия которых основан на разрушающих физических эффектах.

Существенный вклад в развитие теории дезинтеграции внесли отечественные специалисты Ребиндер П.А., Ходаков Г.С., Ревнивцев В.И. Конструктивным совершенствованием, разработкой методик расчета, в том числе и быстроходных измельчающих агрегатов, успешно занимались и занимаются Сиденко П.М., Андреев С.Е., Хинт Н.А., Блиничев В.Н., Богданов В.С. и другие. Коллективами под их руководством выполнен значительный объем научных исследований по проблемам измельчения материалов. Однако эти исследования носят в основном разрозненный характер, направлены на решение отдельных специфических задач для конкретных технологических процессов. Отсутствуют научно обоснованные предложения по выбору рационального способа воздействия на материал для получения продукта требуемой дисперсности с минимальными энергозатратами. Нет общего подхода к определению значения силовых факторов в измельчителях различных типов и оценке влияния инерционных сил на их величину, что особенно важно для средне- и быстроходных машин. Не установлено связи между интенсивностью воздействия рабочих органов на разрушаемый материал и эффективностью самого процесса разрушения.

Поэтому комплексные исследования среднеходных и быстроходных мельниц, поиск общих закономерностей процессов, реализуемых в них, общих подходов к расчету таких агрегатов с обязательным учетом энергетики и эффективности измельчения представляется весьма актуальной задачей.

1610 ар



Работа базируется на обобщении результатов личных исследований автора, полученных при выполнении ряда госбюджетных и хозяйственных тем кафедры машин и аппаратов химических и силикатных производств: Государственной программы ориентированных фундаментальных исследований (ГПЮФИ) «Строительство и архитектура», утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь, от 17.05.2005г. №512 задание 29 «Разработка теоретических основ процесса диспергирования материалов в агрегатах раздавливающего типа с проточной классификацией и создание на их основе энергоэффективных помольных установок» (ГБ 26-103, № гос. регистрации 20064128, 2006–2010 гг.); по темам, включенным в план НИР БГТУ: ГБ 98-018 «Исследование процесса разрушения твердых материалов в жидкой среде под воздействием кавитации» (№ гос. регистрации 19981012, 1998–1999 гг.); ГБ 20-029 «Исследование, моделирование и оптимизация процессов диспергирования и механической активации твердых материалов» (№ гос. регистрации 2000940, 2000-2001 гг.); по прямым заказам предприятий на хозяйственной основе: ХД 24-066, 2004 г. и ХД 27-167, 2007 г.

**Целью исследований** является развитие научных основ совершенствования процессов измельчения и оптимизации измельчающих агрегатов в направлении повышения их эффективности и снижения удельных энергозатрат.

Для достижения поставленной цели необходимо:

— провести анализ теорий разрушения и дезинтеграции материалов и на его основе определить направления совершенствования измельчающих агрегатов и выбрать в качестве объектов исследования наиболее перспективные из них, обеспечивающие возможность значительного повышения эффективности; установить общий критерий оценки воздействия рабочего органа на разрушаемый материал;

— составить математические модели движения материальных потоков и рабочих органов измельчающих машин и с их использованием установить оптимальные конструктивные и технологические параметры этих машин; разработать методы и алгоритмы расчета оптимальных параметров;

— провести экспериментальные исследования измельчителей для определения направлений их рационального использования, проверки адекватности математических моделей, оптимизации параметров, не подлежащих математическому описанию;

— на основе разработанных методов и алгоритмов провести расчет и спроектировать измельчающие агрегаты с оптимальными конструктивными и технологическими параметрами; осуществить опытно-промышленные испытания и внедрение в производство оптимизированных агрегатов.

**Объектом исследования** в работе выбраны среднеходные и быстроходные измельчающие агрегаты и диспергатор кавитационного типа, объединенные одним характерным признаком – значительным влиянием инерционных сил на процесс измельчения материала.

**Предметом исследования** является движение рабочих органов машин, измельчаемого материала и несущей среды (воздуха, воды); процессы измельчения и классификации, эффективность и энергетика процессов; оптимизация процесса и параметров измельчающих машин.

#### **Научная новизна.**

1. Разработана новая обобщенная методология исследований и оптимизации параметров высокоскоростных измельчающих агрегатов, основанная на изучении движения рабочих органов, несущей среды, измельчаемого материала и учете влияния инерционных сил на процесс его разрушения.

2. Предложено математическое описание и алгоритм расчета траектории движения материала в зоне измельчения среднеходных мельниц тарельчатого типа с учетом активных и инерционных сил, позволяющий определить оптимальную скорость вращения тарелки из условия гарантированного попадания материала под размольные органы, обеспечивающую повышение эффективности процесса измельчения.

3. Разработана модель разрушения материала между валком и тарелкой, учитывающая изменение степени измельчения и удельной поверхности при однократном воздействии, позволяющая рассчитать работу разрушения с учетом физических свойств материала и в совокупности с экспериментально определенными затратами на выгрузку готового продукта определить и оптимизировать общие энергозатраты на процесс измельчения в среднеходных мельницах.

4. Составлена модель и математическое описание помола в замкнутом цикле для мельниц непрерывного действия в виде функций нескольких переменных, включающих такие важные параметры, как производительность, степень измельчения, кратность циркуляции, дисперсность продукта, позволяющая с использованием метода нелинейного программирования установить оптимальные значения указанных параметров.

5. Предложен метод определения коэффициента загрузки ударных мельниц, основанный на решении уравнений движения частиц исходного продукта в загрузочном устройстве и в пространстве перед ударными элементами, позволяющий рассчитать максимально возможную производительность в зависимости от размеров мельницы и загружаемого в нее продукта.

6. Предложена физическая модель перемещения элементов загрузки, методика определения наиболее рациональной высоты размольной камеры центробежно-шаровой мельницы, базирующаяся на решении дифференциальных уравнений движения мелющих тел и частиц измельчаемого материала с учетом их взаимодействия; методика определения высоты размольного барабана вертикальной планетарной мельницы, основанная на анализе движения измельчающих тел и загрузки, имитированной в виде сплошной среды.

7. Разработан комплекс теоретических методов по определению границ режимов движения, условий отрыва, высоты падения мелющих тел, границ характерных зон загрузки в горизонтальных планетарных мельницах, с учетом взаимодействия между телами и циклического изменения инерционных сил, позволяющих при их реализации устанавливать и поддерживать оптимальные режимы, давать оценку влияния ударного, раздавливающего и истирающего воздействий на процесс разрушения материала, оценивать степень влияния механики движения загрузки и инерционных сил на эффективность помола.

8. Предложена методика и алгоритм расчета параметров каверны и длины свободного пробега кавитационных пузырьков, базирующаяся соответственно на теореме об изменении кинетической энергии потока и уравнении динамики сферической каверны, позволившие определить оптимальные размеры гидродинамических кавитационных диспергаторов, гарантирующие предотвращение их эрозионного разрушения и обеспечивающие максимальное разрушающее воздействие на измельчаемый материал.

**Практическая значимость работы.** Предложен общий для всех объектов исследования инерционный фактор, позволяющий оценить влияние инерционных сил, а соответственно, и скоростного режима на дисперсность продукта. Научно обосновано создание новых более эффективных конструкций измельчителей, защищенных патентами Республики Беларусь. Разработан комплекс методов и алгоритмов расчета оптимальных конструктивных и технологических параметров средне- и быстроходных измельчителей и диспергаторов кавитационного типа. Все методы апробированы при проектировании промышленных агрегатов, девять из которых внедрены в производство, два прошли промышленные испытания и ещё по двум разработаны технические проекты, переданные заказчику.

**Апробация работы.** Наиболее значимые результаты диссертационной работы, отражающие ее сущность, докладывались на следующих Международных научно-технических конференциях: «Высокие технологии и научно-технический прогресс в строительном комплексе Республики Беларусь» (г. Минск, 1999г.), «Интерстроймех-2002» (г. Могилев, 2002г.), «Новые технологии в химической промышленности» (г. Минск, 2002г.), «Архитектурно-строительное материаловедение на рубеже веков (г. Белгород, 2002г.), «Новейшие достижения в области импортозамещения в химической промышленности и производстве строительных материалов» (г. Минск, 2003г.), «Центробежная техника – высокие технологии» (г. Минск, 2003г.), «Новые технологии рециклинга отходов производства и потребления» (г. Минск, 2004г.), «Центробежная техника – высокие технологии» (г. Минск, 2005г.), «Наука та технології: крок в майбутнє» (г. Днепропетровск, 2007г.), «Научни дни-2008» (г. София, 2008г.), «Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии» (г. Минск, 2008г.); «Moderní vymoženosti vědy - 2009» (Praha, 2008г.), «Настоящи изследвания - 2009» (София, 2008г.), «Perspektywiczne opracowania sa nauka i technikami - 2009» (Przemysl, 2009г.), «Новейшие достижения в области

импортозамещения в химической промышленности и производстве строительных материалов” (Минск, 2009г.), “Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии” (Минск, 2010 г.), 13 научно-технических конференциях БГТУ (1998-2010гг.).

**Опубликованность результатов диссертации.** По теме диссертации опубликованы 73 работы, в том числе 1 монография, 44 статьи (аннотированных ВАК России – 15, ВАК Беларуси – 14), материалы и тезисы 21 конференции, 7 описаний изобретений к патентам Республики Беларусь. Без соавторства опубликована 1 монография, 3 статьи, материалы 2 конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертация (344 с) включает перечень условных обозначений, общую характеристику работы, основную часть, изложенную в 7 главах, заключение и библиографический список (27 с), состоящий из 275 использованных источников и 73 собственных публикаций соискателя. Приложение (32 с) содержит документы, подтверждающие практическое применение результатов исследований. Результаты исследований изложены на 198 с печатного текста и представлены на 144 иллюстрациях (130 с) и в 2 таблицах (2 с).

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведены результаты анализа развития теорий разрушения и дезинтеграции. Установлено, что ни одна из них не ответила на главный вопрос о взаимосвязи между дисперсностью продукта и энергетикой процесса и не представила конкретных зависимостей для расчета энергозатрат в реальных измельчающих агрегатах. Практическая значимость этих теорий заключается в том, что проанализированы основные стадии разрушения материалов, установлены факторы, влияющие на дисперсность продукта, определена доля энергии, затрачиваемая на каждой из стадий. Это позволило наметить пути снижения энергозатрат и выбрать рациональные способы воздействия, обеспечивающие это снижение и удар. Однако для процессов сверхтонкой дезинтеграции, доведения частиц до наноразмеров приходится прибегать к более затратному способу, такому как истирание.

С учетом современных тенденций развития техники и технологии дезинтеграции в качестве объектов исследования выбраны средне- и быстроходные измельчители и кавитационный диспергатор с закруткой потока, характеризующиеся значительным влиянием инерционных сил на разрушение материала. Разработана новая методология исследования и оптимизации параметров выбранных объектов, основанная на комплексном изучении движения рабочих органов, несущей среды и измельчаемого материала. Такой подход дает возможность определить величину и направление действия разрушающих усилий в момент контакта рабочего органа с измельчаемым материалом. Для учета влияния

инерционных сил введен обобщающий инерционный фактор, представляющий собой отношение модуля векторной суммы всех инерционных сил к силе тяжести  $\Phi = |\bar{F}_n|/G$ . С помощью этого фактора можно установить взаимосвязь между величиной сил и значением разрушающих напряжений. В результате определяется степень влияния инерционных сил как разрушающего фактора в объектах исследования при разных способах воздействия на материал в каждом из них. Для указанных объектов выбран обобщающий метод исследований – моделирование, который в комплексе с экспериментальными исследованиями призван обеспечить реализацию поставленной цели.

Во второй главе приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований среднеходных валковых мельниц. Скорость движения рабочих органов в них составляет несколько метров в секунду. Поэтому инерционные силы не настолько велики, чтобы создать в материале напряжения близкие к разрушающим. Его разрушение осуществляется за счет давления размольного вала. В свою очередь инерция является основной движущей силой при транспортировке материала во всех зонах измельчающего агрегата. Траектория и скорость движения материала на подходе к валку существенно влияют на его раздавливающую способность, а на выходе с тарелки – на условия сепарации частиц. Кроме того, эффективность измельчения, энергетика процесса зависят от кратности циркуляции материала по замкнутому контуру, которая непосредственно связана со скоростью его движения. Всё это свидетельствует о необходимости исследования движения частиц материала в различных зонах среднеходной мельницы.

Первая стадия исследований заключалась в моделировании движения материальных потоков в зоне измельчения. В центре тарелки, куда подается подлежащий измельчению материал, образуется слой определенной толщины, закономерности движения которого описываются уравнениями механики сыпучей среды. В частности профиль распределения сыпучего материала по вращающейся тарелке определялся с использованием модели Мизонова-Михеева по уравнению:

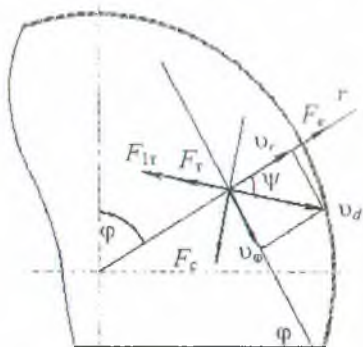


Рисунок 1 – Расчетная схема движения частиц по тарелке

где  $z$  – осевая координата, м;  $f_0$  – коэффициент внутреннего трения материала;  $\omega$  – угловая скорость тарелки, рад/с;  $r$  – текущий радиус, м;

$$z = \left(f_0 + \frac{1}{f_0}\right) \frac{g}{\omega^2 f_0} \ln \frac{g + f_0 \omega^2 r_0}{g + f_0 \omega^2 r} - \frac{r_0 - r}{f_0} \quad (1)$$

где  $z$  – осевая координата, м;  $f_0$  – коэффициент внутреннего трения материала;  $\omega$  – угловая скорость тарелки, рад/с;  $r$  – текущий радиус, м;  $r_0$  – предельный радиус равновесия ( $r_0 = f_0 g / \omega^2$ ), м.



Расчет проводился до значения осевой координаты равной среднему размеру загружаемых в мельницу кусков, что соответствует их распределению в виде монослоя. Дальнейшее перемещение измельчаемого материала по тарелке рассматривалось как движение одиночных частиц, рисунок 1. Составлены уравнения относительного движения частиц в подвижной полярной системе координат. С учетом инерционных кориолисовой и центробежной сил, силы трения материала по тарелке и впервые учтенной силы трения между частицами получили уравнения движения (2).

$$\left\{ \begin{aligned}
 \frac{d^2 r}{dt^2} - r \cdot \left( \frac{d\varphi}{dt} \right)^2 &= -f \cdot g \cdot \frac{\frac{dr}{dt}}{\sqrt{\left( \frac{dr}{dt} \right)^2 + \left( r \cdot \frac{d\varphi}{dt} \right)^2}} - 2 \cdot \omega \cdot r \cdot \frac{d\varphi}{dt} + \omega^2 \cdot r - \\
 &- f_1 \cdot \left( \frac{\omega^2 \cdot r^2 \cdot \frac{d\varphi}{dt} \cdot \frac{dr}{dt}}{\left( \frac{dr}{dt} \right)^2 + \left( r \cdot \frac{d\varphi}{dt} \right)^2} - 2 \cdot \omega \cdot \frac{dr}{dt} \right) \\
 r \cdot \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + 2 \cdot \frac{dr}{dt} \cdot \frac{d\varphi}{dt} &= -f \cdot g \cdot \frac{r \cdot \frac{d\varphi}{dt}}{\sqrt{\left( \frac{dr}{dt} \right)^2 + \left( r \cdot \frac{d\varphi}{dt} \right)^2}} + 2 \cdot \omega \cdot \frac{dr}{dt} - \\
 &- f_1 \cdot \left( \frac{\omega^2 \cdot r^3 \cdot \left( \frac{d\varphi}{dt} \right)^2}{\left( \frac{dr}{dt} \right)^2 + \left( r \cdot \frac{d\varphi}{dt} \right)^2} - 2 \cdot \omega \cdot r \cdot \frac{d\varphi}{dt} \right)
 \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где  $r$ ;  $\varphi$  – текущие координаты частицы в полярной системе;  $\omega$  – угловая скорость тарелки (скорость переносного движения), рад/с;  $f$  – коэффициент трения частиц о тарелку;  $f_1$  – коэффициент взаимного трения между частицами.

Решение этой системы уравнений численными методами позволило реализовать две важные задачи. Во-первых, определить скорость и траекторию движения частицы на выходе с тарелки. Во-вторых, установить оптимальный диапазон частот вращения тарелки из условия гарантированного попадания материала под размольные валки. Это условие заключается в том, что радиальное перемещение частиц материала за время  $t = 1/zn$ , где  $n$  – частота вращения тарелки,  $\text{мин}^{-1}$ ,  $z$  – количество валков, не должно превышать ширины валка  $\Delta r \leq B$ . Инерционный фактор при движении по тарелке изменялся в пределах  $\Phi = 2 \div 10$ .

На выходе с вращающейся тарелки измельченный материал подхватывается воздухом и выносится в сепарационную зону. Здесь важно не

допустить соприкосновения частиц со стенками корпуса над кольцевым зазором. В противном случае будет наблюдаться провал материала под тарелку. Поэтому возникла необходимость изучения траектории движения частиц материала под воздействием газового потока. При этом для обеспечения равномерного распределения воздуха в кольцевом зазоре он подавался в корпус мельницы тангенциально, приобретая при этом форму закрученного потока. Движение частиц в таком потоке характеризуется тремя составляющими: радиальной –  $v_r$ , тангенциальной –  $v_\varphi$  и осевой –  $v_z$ .

В проекциях на оси цилиндрической системы координат уравнения движения твердых частиц в закрученном потоке примут вид:

$$\begin{cases} m \left( \frac{dv_r}{dt} - \frac{v_\varphi^2}{R} \right) = F_r, \\ m \left( \frac{dv_\varphi}{dt} + \frac{2v_r v_\varphi}{R} \right) = F_\varphi \\ m \frac{dv_z}{dt} = F_z - G. \end{cases} \quad (3)$$

где  $m$  – масса частицы;  $R$  – текущий радиус;  $G$  – сила тяжести частицы;  $F_r$ ,  $F_\varphi$ ,  $F_z$  – проекции силы аэродинамического воздействия на оси цилиндрической системы координат.

Сила аэродинамического воздействия воздуха определялась по следующей формуле:

$$\vec{F} = \frac{1}{8} \cdot k_\phi \cdot \zeta \cdot \rho \cdot \pi \cdot d^2 \cdot |\vec{u}_i - \vec{v}| \cdot (\vec{u}_i - \vec{v}), \quad (4)$$

где  $u_i$  – скорость воздушного потока в данной точке кольцевого зазора, м/с;  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $d$  – диаметр частицы, м;  $k_\phi$  – коэффициент формы частицы.

Так как объемная концентрация твердой фазы в потоке  $c \leq 0,02$ , то коэффициент аэродинамического сопротивления рассчитывался по формуле:  $\xi = 24(1 + 0,17 \text{Re}^{2/3}) / \text{Re}$ .

Величину скорости газового потока в зоне кольцевого зазора определили экспериментально с помощью трехканального зонда. Экспериментальные данные аппроксимированы выражениями:

$$\begin{aligned} \vec{u}_\varphi &= 21,11 + 437 \cdot \vec{r} - 9799 \cdot \vec{r}^2 + 120\,905 \cdot \vec{r}^3 - 547\,716 \cdot \vec{r}^4; \\ \vec{u}_z &= 9,74 + 397 \cdot \vec{r} - 13\,733 \cdot \vec{r}^2 + 173\,464 \cdot \vec{r}^3 - 683\,164 \cdot \vec{r}^4. \end{aligned} \quad (5)$$

Решая систему уравнений (3) численными методами с помощью ЭВМ и с учетом уравнений (5), определили значения координат и составляющих скорости движения измельченных частиц в сепарационной зоне. Координаты местонахождения частиц в газовом потоке стали от-

правным пунктом для расчета и конструирования сепарационного устройства, предотвращающего возможные их соприкосновения со стенками корпуса с последующим провалом под тарелку. Это устройство представляет собой усеченный конус с тороидальным кольцом в верхней части.

Важным параметром для среднеходных мельниц, как и для других, являются удельные энергозатраты на проведение процесса измельчения. В тех немногочисленных работах, в которых исследовались энергозатраты для указанных агрегатов, не сделано даже попытки связать их с теоретическими аспектами разрушения и дезинтеграции.

Для оценки работы разрушения автором использовалось уравнение Ребиндера, которое имеет вид:

$$A = \frac{\sigma^2 V}{2E} k_B + \omega_S (S - S_n), \quad (6)$$

где  $\sigma$ ,  $E$  – предел прочности и модуль упругости материала, Па;  $k_B$  – кратность воздействия;  $\omega_S$  – удельная поверхностная энергия, Дж/м<sup>2</sup>;  $S_n$ ,  $S$  – начальная и текущая поверхности измельчаемого материала, м<sup>2</sup>.

Представим процесс разрушения материала между валком и тарелкой как многоцикловый, при котором кубики размером  $u_1$  постепенно уменьшаются до  $u_n$ . Тогда кратность

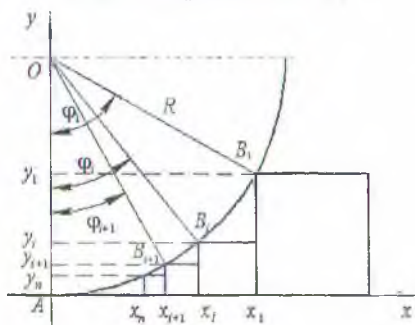


Рисунок 2 – Схема воздействия вала на материал

воздействия определяется количеством кубиков, разместившихся между плоскостью тарелки (ось  $x$ ) от  $x_1$  до  $x_n$  и дугой  $AB_1$  окружности вала.

Координаты любой точки соприкосновения определяются по формулам  $x_i = R \sin \varphi_i$ ;  $y_i = R - R \cos \varphi_i$ . При этом должно выполняться условие  $x_i - x_{i+1} = y_{i+1}$ . Для любой последующей точки контакта можно записать:

$$\varphi_{i+1} = \frac{\pi}{4} - \arcsin \frac{1 - \sin \varphi_i}{\sqrt{2}}. \quad (7)$$

Рассчитав таким образом поверхность при каждом цикле воздействия, определим конечную поверхность  $S_n$ , соответствующую  $u_n$ , и определим работу разрушения по уравнению (6).

Полная работа за один оборот

$$A_{\Sigma} = A \cdot \frac{360}{\varphi_1} \cdot \frac{R_T}{R}. \quad (8)$$

где  $R_T$  – радиус беговой дорожки тарелки;  $R$  – радиус вала, м.

Мощность, затрачиваемая на измельчение  $P = A_z \cdot n \cdot z$ , где  $n$  – частота вращения тарелки,  $z$  – количество валков. Экспериментальная проверка показала хорошую сходимость с результатами расчета мощности по предлагаемой методике.

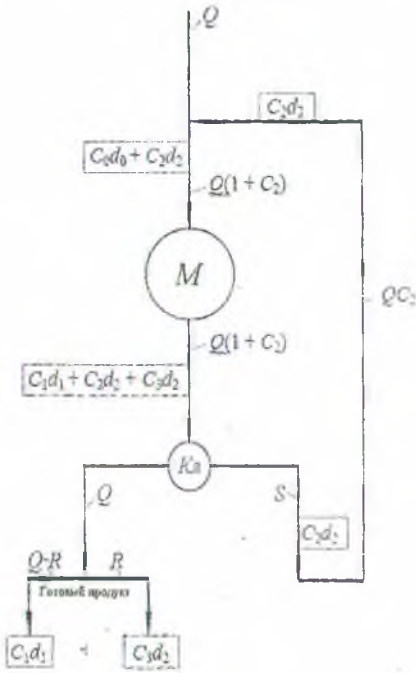


Рисунок 3 – Модель замкнутого цикла среднеходной мельницы

Второй важной составляющей общих энергозатрат в мельнице данного типа являются затраты на пневмотранспорт измельченного продукта, которые зависят прежде всего от гидравлического сопротивления всего агрегата вместе с сепаратором. Экспериментально определено гидравлическое сопротивление в зависимости от скорости газа на полное сечение мельницы и угла установки лопастей проходного сепаратора. Установлено, что в оптимальном скоростном режиме и угле открытия лопастей 20–30° гидравлическое сопротивление мельницы не превышает 1000 Па и энергозатраты на пневмотранспорт втрое меньше чем на разрушение материала валками. Общие энергозатраты без учета системы аспирации и подачи материала в мельницу не превышают 10 кВт · ч/т, что сопоставимо с зафиксированными в промышленных условиях.

Одновременно с энергозатратами оценивалась и эффективность измельчения по величине удельной поверхности. Приемлемую для производственных условий удельную поверхность 2500–3500 см<sup>2</sup>/г можно получить при угле установки лопастей 30–35°. Но с уменьшением угла удельная поверхность может быть доведена до 5000–6000 см<sup>2</sup>/г.

Важным для среднеходных мельниц, работающих в замкнутом цикле, является оптимизация параметров этого цикла: степени измельчения, эффективности сепарации, кратности циркуляции материала, производительности мельниц и др. В работе предложена схема замкнутого цикла (рисунок 3) и ее математическое описание. Согласно данной схемы эффективность сепарации  $E = C_2 / (C_2 + C_3)$ , где  $C_2$  – доля циркулирующей загрузки,  $C_3$  – доля крупной фракции в готовом продукте.

Для определения степени измельчения с учетом эффективности сепарации получено уравнение:

$$i = \frac{(1-J)d_0 + JC_3d_2}{(1-C_3)(1-J)d_1 + C_3d_2} \quad (9)$$

Таким образом, получена зависимость целевой функции  $i$  в явном виде от пяти параметров. Задача решена методами нелинейного программирования и установлены оптимальные параметры для достижения максимальной степени измельчения.

Однако степень измельчения – это качественный показатель, и его недостаточно для проведения полного анализа работы мельницы. Необходимо учесть количественных показателей, главным из которых является производительность. Для расчета производительности среднеходной валковой мельницы можно использовать следующую зависимость:

$$Q_m = \frac{1}{k_u} \cdot v_u \cdot B \cdot h \cdot \rho \cdot z, \quad (10)$$

где  $k_u$  – кратность циркуляции;  $v_u$  – окружная скорость вала, м/с;  $B$  – ширина вала, м;  $h$  – толщина слоя материала под валком, м;  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $z$  – число валков.

Кратность циркуляции можно определить исходя из общего количества циклов воздействия на материал до его полного разрушения. Это количество циклов  $k$  определяется по следующей формуле:  $k = 3 \cdot \lg(i) / \lg(a)$ , где  $a$  – объемная степень измельчения при однократном воздействии. В свою очередь, для среднеходной валковой мельницы общее количество циклов равно  $k = k_u \cdot k_b$ , где  $k_b$  – количество циклов воздействия вала на материал за один проход его по тарелке мельницы. С точки зрения оптимизации по разработанной схеме, все параметры, кроме кратности циркуляции, можно считать постоянными величинами. Обозначим их константой  $\Psi$ , и окончательно формула для производительности примет вид

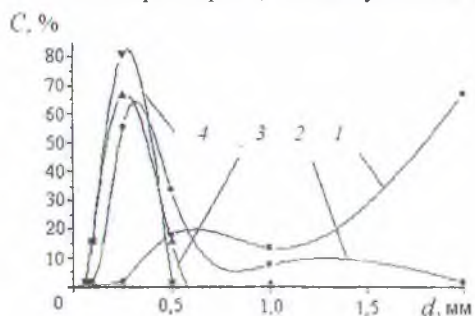
$$Q_m = \frac{k_b \cdot \lg(a)}{3 \cdot \lg(i)} \cdot \Psi. \quad (11)$$

Апробация предложенного метода проведена для оптимизации параметров полупромышленной валковой мельницы. При решении поставленной задачи с помощью ЭВМ была найдена максимальная производительность  $Q_m = 370$  кг/ч помольного агрегата при оптимальном значении кратности циркуляции  $k_u = 6$ . При этом степень измельчения достигала  $i = 70$ .

**Третья глава** посвящена изучению процесса измельчения в мельнице ударного действия дезинтеграторного типа. Проведена оценка разрушающей способности по величине инерционного фактора. Разрушение материала в случае прямого удара начнется при  $\Phi \geq 50$ , что говорит о значительно большем влиянии инерционных сил на процесс измельчения в мельницах ударного действия по сравнению со среднеходными. Эффективное измельчение происходит при  $\Phi \geq 180$ , а для механической активации его значение должно быть  $\Phi \geq 300$ .

Определены преимущества многорядного бильного измельчителя перед другими ударными мельницами и намечены направления его использования. Одним из них является механическая активация, в частности вяжущих веществ. Проведена обработка цемента марки М400 в дисмембраторе, показавшая увеличение удельной поверхности цемента с  $2500 \text{ см}^2/\text{г}$  до  $4700 \text{ см}^2/\text{г}$ . Образцы, сформованные из активированного цемента, показали увеличение прочности на 30–35% во все сроки твердения. При достижении равнопрочности образцов расход активированного цемента на 15% ниже чем обычного.

Наряду с механической активацией мельницы ударного действия могут использоваться для измельчения материалов органического происхождения. В связи с этим были проведены исследования по измельчению бетаина гидрохлорида, используемого в производстве медпрепаратов. При



**Рисунок 4 – Изменение гранулометрического состава бетаина гидрохлорида: 1 – исходный; 2 – 4 – после обработки в дисмембраторе при скорости 10, 25, 50 м/с соответственно**

однократном прохождении через дисмембратор исходный продукт, характеризуемый содержанием частиц размером 2 мм более 50% и удельной поверхностью  $350\text{--}400 \text{ см}^2/\text{г}$ , доведен до дисперсности с  $R_{200} < 20\%$  и удельной поверхности  $1500\text{--}1600 \text{ см}^2/\text{г}$ . Оптимальная скорость вращения ротора при этом составляла 45–50 м/с, рисунок 4. Проведенные опыты подтвердили возможность использования дисмембратора для помола бетаина гидрохлорида, но одновременно обнажили проблемные стороны

обработки материалов в дисмембраторе, которые характерны и для других измельчителей ударного действия. Выяснилось, что за один проход даже при достаточно высокой скорости вращения ротора дисперсность продукта не очень высока. Решение указанной проблемы возможно при организации замкнутого цикла работы дисмембратора.

В связи с этим предложено две конструкции дисмембраторов, защищенных патентами Республики Беларусь, с компактным встроенным классификатором. Пробные опыты по измельчению материала отмечены устойчивой работой дисмембратора с классифицирующей камерой в широком диапазоне скоростей и значительным увеличением удельной поверхности готового продукта.

При загрузке материала в дисмембратор в виде аэросмеси существенно возрастает скорость его движения в загрузочном патрубке и в предпальцевом пространстве, что сопровождается значительным инерционным воздействием. Это приводит к неравномерности распределения материала в межпальцевом пространстве и как следствие к снижению эффективности измельчения и производительности. Для

управления процессом измельчения возникла необходимость в разработке методики определения коэффициента загрузки. С целью реализации указанной задачи составлены математические модели движения частиц в загрузочном патрубке (12) и в предпальцевом пространстве. Сила аэродинамического воздействия определялась по формуле (4) как и в среднеходных мельницах. Специфика движения материала в дезинтеграторе отличается его значительно большей концентрацией в воздушном потоке, которая учтена путем изменения коэффициента аэродинамического сопротивления.

Определенные в результате решения системы уравнений (12) скорости и ускорения частиц явились начальными условиями для расчета их распределения в предпальцевом пространстве, математическая модель для которого подобна предыдущей. Отличие заключается в том, что движение рассматривается в одной плоскости  $Oxy$  и не учитывается сила трения.

$$\ddot{y} = (1 - c_1 \xi_1) \times \left[ \begin{aligned} & 18 \frac{k_{\Phi} \rho_s}{d^2 \rho_w} (u_y - v_y) \times \\ & \left( 1 + 0,17 \left( \frac{d \sqrt{(u_y - v_y)^2 + (u_z - v_z)^2}}{v} \right)^{2/3} \right) \cdot v + \\ & + g - fg \cos \alpha \sin \alpha \end{aligned} \right] ; \quad (12)$$

$$\ddot{z} = (1 - c_1 \xi_1) \times \left[ \begin{aligned} & 18 \frac{k_{\Phi} \rho_s}{d^2 \rho_w} (u_z - v_z) \times \\ & \left( 1 + 0,17 \left( \frac{d \sqrt{(u_y - v_y)^2 + (u_z - v_z)^2}}{v} \right)^{2/3} \right) \cdot v - \\ & - fg \cos^2 \alpha, \end{aligned} \right]$$

где  $u, v$  – скорости воздуха и частиц соответственно;  $\rho_w, \rho_m$  – плотность воздуха и материала;  $\nu$  – кинематическая вязкость воздуха;  $k_{\Phi}$  – коэффициент формы;  $d$  – диаметр частиц;  $c_1$  – концентрация твердой фазы;  $\alpha$  – угол наклона загрузочного патрубка;  $\xi_1$  – коэффициент аэродинамического сопротивления.

Последовательный расчет по двум указанным зонам дал возможность определить распределение частиц исходного продукта в межпальцевое пространство. На рисунке 5 показано распределение частиц размером более 82,8 мкм при частоте вращения 6000 мин<sup>-1</sup>.

Коэффициент загрузки  $k_{згр} = \theta / 360$ , где  $\theta$  – сектор ротора, заполненный материалом. Итоговая формула для определения производительности выглядит следующим образом:

$$Q = k_{згр} c_2 \rho [\pi l_p \delta (D_{II} - \delta) - l_p S k] n \quad (13)$$

Адекватность модели подтверждена экспериментально

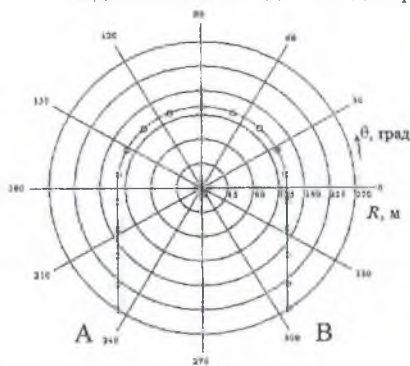


Рисунок 5 – Распределение частиц по сечению роторам при наклонном

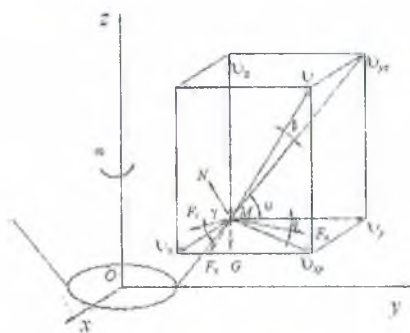


Рисунок 6 – Расчетная схема центробежно-шаровой мельницы

мельющего тела (частицы) под воздействием силы тяжести  $G$ , трения  $F_t$ , инерционных центробежной  $F_c$  и кориолисовой  $F_c$  сил. В качестве объекта исследования принята мельница с диаметром ротора 0,5 м. Причём

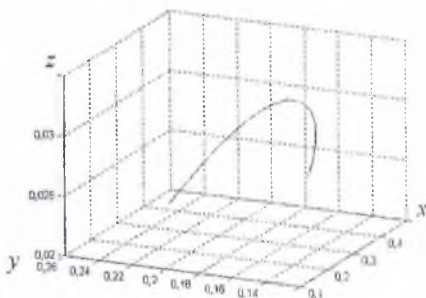


Рисунок 7 – Траектория движения частицы по вертикальной стенке

В четвертой главе приведены результаты аналитических исследований движения мельющих тел и материала в скоростной центробежно-шаровой мельнице. Характерным признаком этих мельниц является наличие быстро вращающегося вертикального ротора. За счет этого измельчающие тела и материал вовлечены в интенсивное движение в вертикальной плоскости. Таким образом, шаровая мельница превращается в быстроходную, и определяющее влияние на специфику движения загрузки и на разрушающее воздействие оказывают инерционные силы.

Важнейшим конструктивным параметром этого агрегата является высота камеры измельчения, которая определяется высотой подъема мельющих тел и измельчаемого материала. Их движение рассмотрено в подвижной декартовой системе координат (рисунок 6), вращающейся с угловой скоростью равной скорости вращения ротора. На начальном этапе анализировалось движение одиночного реализован позонный метод расчета для плоского днища, конического переходного участка и вертикальной стенки, когда выходные параметры предыдущей зоны являлись начальными для последующей. Результаты этой работы представлены на рисунке 7 в виде траектории движения измельчаемой частицы по вертикальной стенке ротора. Определяющий параметр при этом – максимальное значение координаты  $z$ . Высота подъема



измельчающих тел за счет их перекатывания в среднем на порядок выше, чем частиц материала. При этом инерционный фактор достигает значений  $\Phi=500$ , что значительно выше по сравнению с тихоходными барабанными мельницами ( $\Phi \leq 1,0$ ).

Дальнейшее развитие методики расчета заключалось в учете взаимодействия между мелющими телами (шарами). Для этого принята модель их движения в виде цепочки, на каждый шар которой дополнительно действуют инерционная сила давления снизу и гравитационная в виде веса столбика шаров сверху. Кроме того по аналогии с уравнением (2) учитывалась сила трения между шарами, движущимися в соседних цепочках. В результате уравнение движения преобразовано к виду:

$$\left\{ \begin{aligned}
 \frac{dv_x}{dt} &= \omega^2 x + 2\omega v_y - f \left[ (\omega^2 y - 2\omega v_x) \sin \alpha + g \cos \alpha \right] \frac{v_x}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}} - \\
 &- f_1 \left( 2\omega \sqrt{v_x^2 + v_y^2} - \omega^2 x \frac{v_x}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}} \right) \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}; \\
 \frac{dv_y}{dt} &= \omega^2 y + 2\omega v_x - f \left[ (\omega^2 y - 2\omega v_x) \sin \alpha + g \cos \alpha \right] \frac{\sqrt{v_y^2 + v_z^2}}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}} \cos \alpha - \\
 &- f_1 \left( 2\omega \sqrt{v_x^2 + v_y^2} - \omega^2 x \frac{v_x}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}} \right) \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} + \\
 &+ \left[ \frac{j \cdot \omega^2 (r^3 - r_{ш}^3)}{\pi \cdot r \cdot r_{ш}} \cos \alpha - \frac{g(H-z)}{2r_{ш}} \sin \alpha \right] \cos \alpha; \\
 \frac{dv_z}{dt} &= -g - f \left[ (\omega^2 y - 2\omega v_x) \sin \alpha + g \cos \alpha \right] \frac{\sqrt{v_y^2 + v_z^2}}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}} \sin \alpha + \\
 &+ \left[ \frac{j \cdot \omega^2 (r^3 - r_{ш}^3)}{\pi \cdot r \cdot r_{ш}} \cos \alpha - \frac{g(H-z)}{2r_{ш}} \sin \alpha \right] \sin \alpha,
 \end{aligned} \right. \quad (14)$$

где  $v_x, v_y, v_z$  – проекции скорости частицы (шара) на оси координат, м/с;  $f, f_1$  – коэффициенты трения частиц по ротору и между собой;  $r, r_{ш}$  – текущий радиус и радиус шара, м;  $H$  – высота ротора, м;  $j$  – коэффициент заполнения столбика шарами;  $\alpha$  – угол наклона конической поверхности ротора, град.

Расчеты с использованием системы уравнений (14) показали, что учет взаимодействия между элементами загрузки важен для частиц измельчаемого материала, скользящих по поверхности. С уменьшением диаметра частиц высота их подъема увеличивается. В результате происходит распределение по размерам, улучшаются условия измельчения и последующей сепарации частиц. На высоту подъема мелющих тел дополнительные силы не оказывают существенного влияния и для предварительных расчетов мельницы можно использовать математическую модель одиночного тела.

Тестовые эксперименты по измельчению материалов в центробежно-шаровых мельницах показали их высокую эффективность и возможность использования для некоторых технологий.

**Пятая глава** посвящена исследованию планетарных мельниц. Отличительной особенностью планетарных мельниц является то, что преобладающими силовыми факторами в них становятся инерционные силы. Измельчаемый материал разрушается от комплексного воздействия удара, истирания и раздавливания, которое возникает от действия инерционных сил. Величина этих сил значительно превосходит силу тяжести, что способствует интенсификации измельчения.

Анализ работ по исследованию планетарных мельниц показал, что в теоретической части не установлено четких границ режимов движения мелющих тел, не проанализировано изменение силовых факторов и границ помольных зон за один полный цикл, соответствующий одному обороту водила. В экспериментальной части не установлено в полном объеме влияние конструктивных параметров мельницы на движение мелющих тел и, как следствие, эффективность измельчения. Все указанные недостатки, выявленные в работах предшественников, стали ориентиром, на котором строилась программа исследования планетарных мельниц. Основным объектом исследования выбрана горизонтальная планетарная мельница, имеющая наибольшие перспективы промышленной реализации.

Уравнение относительного движения элемента загрузки в планетарной мельнице можно представить в виде:

$$m\vec{a}_d = \vec{G} + \vec{F}_T + \vec{F}_{1e} + \vec{F}_{2e} + \vec{F}_c + \vec{F}_p, \quad (15)$$

где  $G$ ,  $F_T$  – силы тяжести и трения, Н;  $F_{1e}$ ,  $F_{2e}$  – переносные инерционные силы, связанные с поворотом водила и барабана, Н;  $F_c$  – кориолисова инерционная сила, Н;  $F_p$  – сила взаимодействия (давление) между шарами, Н.

В сегменте, занимаемом загрузкой, мелющие тела могут быть прижаты к стенкам барабана и перемещаться вместе с ним без скольжения, двигаться безотрывно со скольжением или вообще отрываться от общей массы загрузки и находиться в свободном падении до соприкосновения со стенками. В соответствии с таким характером движения могут реализовываться разные способы разрушающего воздействия на материал: раздавливание, истирание, удар. Сложность механики движения мелющих тел вынуждает исследователей прибегать к упрощениям. В частности, режимы движения загрузки определяются на примере одиночного измельчающего тела как в обычной барабанной, так и в планетарной мельницах. Анализ движения одиночного мелющего тела можно проводить в системе координат с поступательным переносным движением, рисунок 8. В этом случае удастся упростить расчетную схему, избавившись, например, от кориолисовой силы инерции.

Для взаимосвязи геометрических параметров мельницы и элементов ее привода было введено два геометрических критерия:  $k = r / R$ ;  $b = r_6 / r$ , где  $r_6$  – внутренний радиус барабана, м;  $R$  – радиус неподвижной

кольцевой поверхности, по которой осуществляется обкатка барабанов или приводных элементов,  $m$ ;  $r$  – радиус приводного элемента,  $m$ .

При этом инерционные силы с учетом критериев  $k$  и  $b$  рассчитываются по формулам:

$$F_{1e} = \frac{m\omega^2 k^2 R}{1 \pm k}; \quad F_{2e} = m\omega^2 k R b. \quad (16)$$

В выражениях (16), а также в последующих формулах с символами « $\pm$ » и « $\mp$ » верхний знак применим для планетарных мельниц с внешней, а нижний – с внутренней обкаткой барабанов.

В результате анализа силовой схемы получили формулы для определения первой критической скорости начала водопадного режима

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{g(1 \pm k)}{kR[f(1 \pm k) \pm fk \sin(\varphi) - k \cos(\varphi)]}}. \quad (17)$$

и второй критической скорости его перехода в центрифугальный

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{g(1 \pm k)}{kR}}. \quad (18)$$

Для планетарных мельниц основными рабочими режимами считаются водопадный и центрифугальный. В водопадном преобладающими способами воздействия являются истирание и удар. Для ударного воздействия важны условия отрыва и высота падения мелющих тел.

Условия отрыва определены по нулевому значению реакции связи, причем по ее относительной величине, отнесенной к единице массы. При значении критерия  $b=1$ .

$$\tilde{N} = \Omega^2 R(1+k) \left[ \frac{1+k}{k} + \cos\left(\frac{\varphi}{k}\right) \right] - g \sin\left(\frac{1+k}{k} \varphi\right) \leq 0. \quad (19)$$

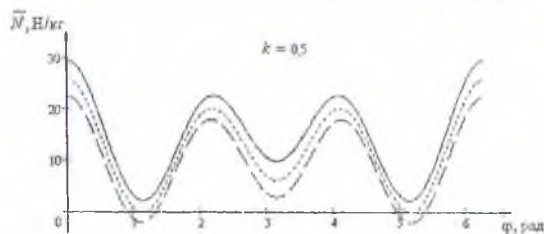


Рисунок 9 – Зависимость относительной реакции связи от угла поворота водила при внешней обкатке

Расчеты по формуле (19) для мельницы с радиусом обкатки  $R = 0,2$  при разных угловых скоростях показали, что изменение реакции связи носит циклический характер, рисунок 9. Участки на графике, на которых  $\tilde{N} < 0$  соответствуют отрыву мелющих тел. Однако при

одном положении водила мелющие тела могут находиться в любой точке барабана. Поэтому возникла необходимость определения условий отрыва, а значит нормальной реакции связи как функции двух углов  $\tilde{N} = f(\varphi; \psi)$ . Эта функциональная связь устанавливается уравнением:

$$\tilde{N} = \omega^2 k R \left[ 1 + \frac{k}{1+k} \cos(\psi - \varphi) \right] - g \sin(\psi) \leq 0 \quad (20)$$

Расчеты по уравнению (20) дали возможность построить графическое отображение функциональной зависимости  $\tilde{N} = f(\varphi; \psi)$  в виде криволинейной поверхности, рисунок 10. Сечение этой поверхности плоскостью  $\tilde{N} = 0$  позволило получить линии уровня нулевого значения реакции связи, рисунок 11. Зоны, ограниченные нулевой линией, показывают диапазон изменения углов  $\varphi$  и  $\psi$ , при которых возможен отрыв мелющих тел от стенки барабана.

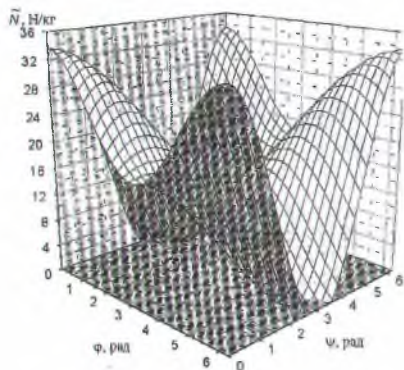


Рисунок 10 – Зависимость относительной реакции связи  $\tilde{N}$  от углов  $\varphi$  и  $\psi$  при внешней обкатке барабанов

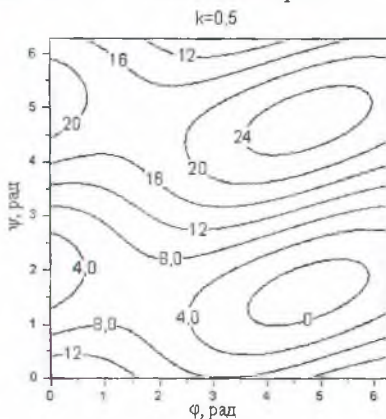


Рисунок 11 – Линии уровня относительной реакции связи при внешней обкатке барабанов

Движение мелющих тел после отрыва по криволинейной траектории описывается системой уравнений.

$$\begin{cases} m\ddot{x} = F_{1e} \cos \varphi; \\ m\ddot{y} = F_{1e} \sin \varphi - mg. \end{cases} \quad (21)$$

После двойного интегрирования по переменной  $t$  были получены выражения для определения координат траектории падения:

$$\begin{cases} x = -R(1 \pm k) \cos \Omega t + C_1 t + C_2; \\ y = -R(1 \pm k) \sin \Omega t - \frac{gt^2}{2} + C_3 t + C_4. \end{cases} \quad (22)$$

Постоянные интегрирования  $C_1, C_2, C_3$  и  $C_4$  находились из условия, что в момент отрыва при  $t_1 = 0$  мелющее тело прижато к внутренней

поверхности помольного барабана. Это означает, что угол поворота водила в момент отрыва  $\varphi_B$  можно определить по уравнению (19).

Выражения для расчета постоянных интегрирования выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} C_1 &= \Omega R(1 \pm k) \sin\left(\frac{1 \pm k}{k} \varphi_B\right); & C_2 &= kR \cos\left(\frac{1 \pm k}{k} \varphi_B\right) + R(1 \pm k); \\ C_3 &= \Omega R(1 \pm k) \left[ \cos\left(\frac{1 \pm k}{k} \varphi_B\right) + 1 \right]; & C_4 &= kR \sin\left(\frac{1 \pm k}{k} \varphi_B\right). \end{aligned} \quad (23)$$

Координаты окружности барабана, вовлеченного в планетарное движение, определяются по формулам:

$$\begin{cases} x = kR \cos\left(\frac{1 \pm k}{k} \varphi\right); \\ y = kR \sin\left(\frac{1 \pm k}{k} \varphi\right). \end{cases} \quad (24)$$

Результат совместного решения уравнений (22) и (24) имеет вид:

$$\begin{cases} kR \cos\left(\frac{1 \pm k}{k} \varphi\right) + R(1 \pm k) \cos \varphi - C_1 \frac{\varphi}{\Omega} - C_2 = 0; \\ kR \sin\left(\frac{1 \pm k}{k} \varphi\right) + R(1 \pm k) \sin \varphi + \frac{g\varphi^2}{2\Omega^2} - C_3 \frac{\varphi}{\Omega} - C_4 = 0. \end{cases} \quad (25)$$

По этим уравнениям можно определить угол поворота водила  $\varphi_{вс}$  за время падения мелющего тела, а затем по известным углам  $\varphi_B$  и  $\varphi_{вс}$  вычислить величину угла  $\varphi_c = \varphi_B + \varphi_{вс}$ . Далее с помощью выражений (22) определялись координаты помольного тела в момент отрыва и соприкосновения, разность ординат которых представляет собой высоту падения. Проведя по такому методу ряд расчетов, удалось установить влияние геометрического критерия  $k$  на высоту падения  $h$ .

Методика расчета высоты падения мелющего тела получилась несколько усложненной. Поэтому возникла идея ее упрощения, основанная на контроле текущего расстояния  $l$  от точки на криволинейной траектории до центра окружности, рисунок 12. Это расстояние

$$\begin{aligned} l^2 &= [x_0 - (v_0 \sin \theta_0) t_1 - R(1 + k) \cos(\Omega t_1)]^2 + \\ &+ [v_0 + (v_0 \cos \theta_0) t_1 - (gt_1^2 / 2) - R(1 + k) \sin(\Omega t_1)]^2, \end{aligned} \quad (26)$$

где  $x_0$ ,  $v_0$ ,  $\theta_0$  – координата, скорость и угол в момент отрыва;  $t_1$  – время полета.

В момент отрыва и соприкосновения с барабаном  $l = R$ , а при свободном полете  $l < R$ . Построив зависимости  $l = f(t_1)$  при разных скоростях вращения, определим время полета, а по нему высоту падения мелющего тела, рисунок 14.

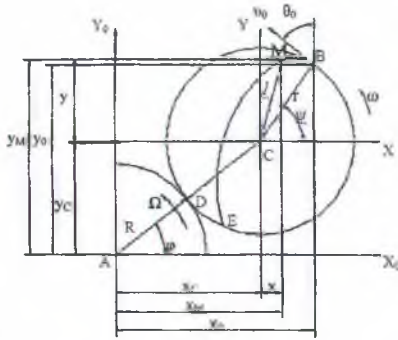


Рисунок 12 – Расчетная схема координатного определения высоты падения

прижаты к стенке барабана ( $N > 0$  и  $F_t \leq f \cdot N$ ), отрываться от нее ( $N < 0$ ) или совершать межсложное движение ( $N > 0$  и  $F_t > f \cdot N$ ).

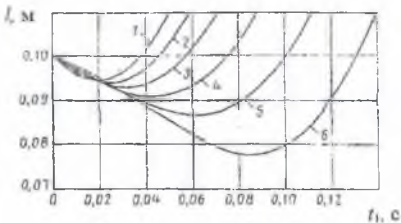


Рисунок 13 – Зависимость расстояния  $l$  от времени  $t_1$  падения мелющего тела

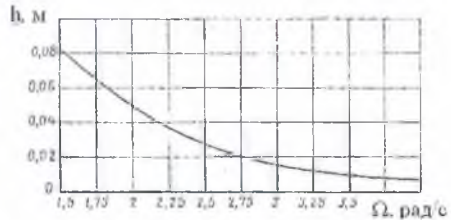


Рисунок 14 – Зависимость высоты  $h$  падения мелющего тела от угловой скорости  $\Omega$  водила

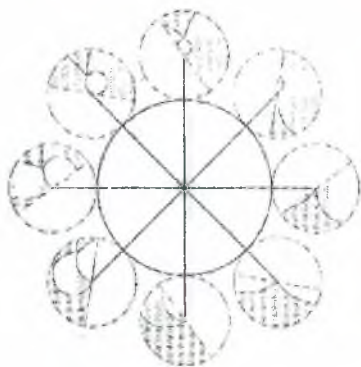
В этой связи необходимо вернуться к исходному уравнению относительного движения (15) и переносное движение системы координат  $Axy$  (рисунок 8) принимать вращательным с соответствующим учетом инерционной кориолисовой силы  $F_c = 2m\omega_{xy}$ .

Для учета взаимодействия между шарами принята модель послойного сдвига их коаксиально расположенных рядов. При этом дополнительный силовой фактор, определяющий это взаимодействие, представляет собой силу радиального давления столбика шаров на поверхность сдвига. Уравнение для расчета силы давления получено методом интегрирования

$$\tilde{F}_{ip} = 2r_{ш}^2 \rho \left[ \omega^2 \frac{(r_1 + r_{ш})^2 - r_0^2}{2} + (r_1 + r_{ш} - r_0) \left[ \frac{\omega^2 k^2 R}{1+k} \cos(\psi - \varphi) - g \sin \psi \right] \right] \quad (27)$$

где  $r_1, r_{ш}, r_0$  – радиусы текущий, шара и начальный соответственно, м.

Для каждого значения  $\varphi$  с определенным шагом по  $r_i$  и  $\psi$  определялись силы  $\tilde{N}$ ,  $\tilde{F}_T$  и  $\tilde{F}_r$ . В результате установлены границы характерных зон: отрыва, скольжения и безотрывного движения. На рисунке 15 показано изменение этих границ для мельницы с радиусом  $R = 0,2$  м при  $k = 0,25$  и  $\Omega = 3,13$  рад/с.



**Рисунок 15 – Изменение границ помольных зон**

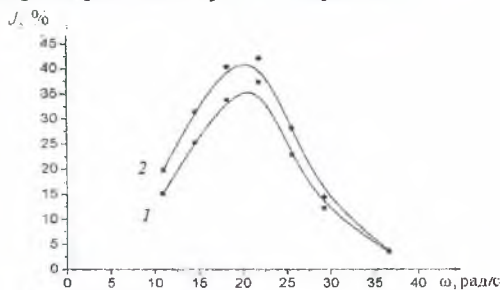
При переходе к чисто центрифугальному режиму зона отрыва практически исчезает, преобладающими становятся зоны скольжения и безотрывного движения. Это свидетельствует о преобладающем значении истирающего и особенно раздавливающего факторов разрушения.

По результатам исследования механики движения мелющих тел сделаны предположения о степени ее влияния на эффективность измельчения. Эти предположения нуждались в экспериментальной проверке. Экспериментальные исследования заключались в определении эффективности измельчения при различных способах обкатки, режимах движения загрузки, конструктивных и технологических параметрах. Основным измельчаемым материалом принят гипсовый камень, эффективность определялась как

$$J = 100 - R_{100}, \quad (28)$$

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

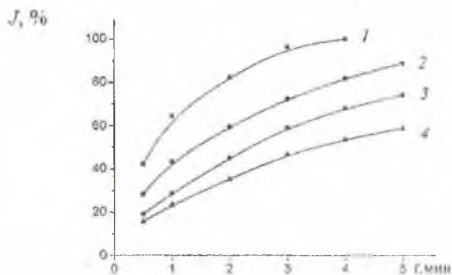
На рисунке 16 представлены экспериментальные зависимости изменения эффективности помола при фиксированном времени обработки, равном 10 мин. Максимальная эффективность наблюдается на границе перехода водопадного режима в центрифугальный. Причем при внешней обкатке эффективность несколько выше. Увеличение геометрического критерия  $k$  приводит к повышению эффективности измельчения при внешней обкатке и снижению при внутренней. Однако эффективность в обоих случаях не превысила 50%, что привело к необходимости проводить исследования в центрифугальном режиме. Опыты по измельчению гипсового камня в этом режиме показали, что эффективность диспергирования уже за одну минуту при



1 – внутренняя обкатка; 2 – внешняя обкатка

**Рисунок 16 – Зависимость эффективности помола от скорости вращения барабанов и способа обкатки**

угловой скорости вращения барабанов 180 рад/с превысила результаты десятиминутной обработки в водопадном режиме. По кинетическим кривым (рисунок 17) видно, что в этом режиме эффективность измельчения гипсового камня уже через четыре минуты приближается к 100%, удельная поверхность при этом достигает 6000 см<sup>2</sup>/г. При внутренней обкатке её величина несколько выше. Из этого графика также видно, что с увеличением прочностных характеристик материала эффективность измельчения уменьшается. Экспериментальные данные хорошо коррелируют с изменением инерционного фактора. Так, в водопадном режиме его значение не превышает  $\Phi=10$ , а в центрифугальном достигает  $\Phi=440$ , вследствие чего наблюдается увеличение эффективности.



1, 3, 4 – внутренняя обкатка и гипсовый камень, клинкер, стеклобой соответственно; 2 – внешняя обкатка (гипсовый камень)

**Рисунок 17 – Влияние времени и прочностных характеристик материала на эффективность помола в центрифугальном режиме**

материала на сжатие и срез. Так для известняка средней плотности при предполагаемом его измельчении в планетарной мельнице с внешней обкаткой ( $R=0,2$  м,  $k=0,5$ ) сжимающие напряжения могут достигать 60 МПа, истирающие – 40 МПа. С учетом дополнительной высокой цикличности воздействия происходит значительное увеличение эффективности измельчения.



**Рисунок 18 – Расчетная схема вертикальной планетарной мельницы**

В планетарных мельницах можно установить взаимосвязь между инерционными силами и разрушающими напряжениями при всех способах воздействия на материал. При водопадном режиме напряжения, создаваемые в материале за счет раздавливания, удара и истирания, ниже разрушающих. Этот режим характеризуется усталостным разрушением материала за счет циклического воздействия мелющих тел. В центрифугальном режиме нормальные и касательные напряжения от действия инерционных сил возрастают настолько, что превышают предел прочности

материала на сжатие и срез. Так для известняка средней плотности при предполагаемом его измельчении в планетарной мельнице с внешней обкаткой ( $R=0,2$  м,  $k=0,5$ ) сжимающие напряжения могут достигать 60 МПа, истирающие – 40 МПа. С учетом дополнительной высокой цикличности воздействия происходит значительное увеличение эффективности измельчения.

В работе начаты исследования вертикальных планетарных мельниц. Основная расчетная схема этого агрегата подобна на схему центробежно-шаровой мельницы, рисунок 6. Отличие заключается в том, что в горизонтальной плоскости появляется дополнительная инерционная сила  $F_{2e}$ , связанная с переносным движением бара-



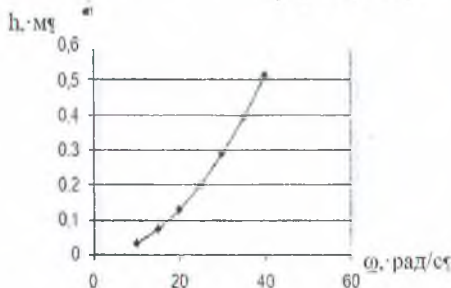
бана, рисунок 18.

При этом относительная реакция, по которой определяется сила трения, рассчитывается по формуле:

$$\tilde{N} = \left[ \omega^2 x + \omega^2 R \left( \frac{k}{1+k} \right) \cos \left( \frac{\omega t}{1+k} \right) - 2\omega v_x + g \cos \alpha \right] \quad (29)$$

Уравнения относительного движения в проекциях на оси системы координат  $Axyz$  будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \frac{dv_x}{dt} &= \omega^2 x + \omega^2 R \left( \frac{k}{1+k} \right) \cos \left( \frac{\omega t}{1+k} \right) - 2\omega v_y - f[\tilde{N}] \frac{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}} \cos \alpha \\ \frac{dv_y}{dt} &= -\omega^2 y + \omega^2 R \left( \frac{k}{1+k} \right) \sin \left( \frac{\omega t}{1+k} \right) + 2\omega v_x - f[\tilde{N}] \frac{v_y}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}} \\ \frac{dv_z}{dt} &= -g - f[\tilde{N}] \frac{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}} \sin \alpha \end{aligned} \quad (30)$$



**Рисунок 19 – Зависимость высоты подъема мелющего тела от угловой скорости барабана**

В результате реализации такого же алгоритма расчета как и для центробежно-шаровых мельниц установили изменение высоты подъема мелющих тел в вертикальной планетарной мельнице, рисунок 19.

Но даже на начальном этапе исследований появилась необходимость спрогнозировать поведение загрузки в исследуемом агрегате. С этой целью она была представлена в виде сплошной среды – жидкости, распределение которой во вращающемся цилиндре определяется путем интегрирования уравнений поверхности уровня, имеющих вид:

$$F_x dx + F_y dy + F_z dz = 0, \quad (31)$$

С учетом двух инерционных сил  $F_{1e}$  и  $F_{2e}$  уравнения (31) преобразуется к виду:

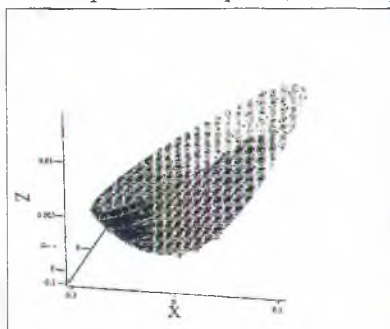
$$\left( \omega^2 x + \omega^2 R \frac{k}{1+k} \right) dx + \omega^2 y dy - g dz = 0, \quad (32)$$

Его интегрирование дало возможность получить формулу для расчета координаты  $z$ :

$$z = z_0 + \frac{\omega^2 r}{g} \left( \frac{r}{2} + R \frac{k}{1+k} \cos \theta \right), \quad (33)$$

где  $\theta$  – угол между векторами сил  $F_{1e}$  и  $F_{2e}$ .

Профиль распределения загрузки, построенный с использованием уравнения (33) показан на рисунке 20 и представляет собой параболоид, смещенный в сторону действия переносной силы инерции  $F_{2e}$ . Высота подъема загрузки соизмерима с высотой подъема одиночного мелющего тела, определенной ранее, что говорит об адекватности обоих методов.

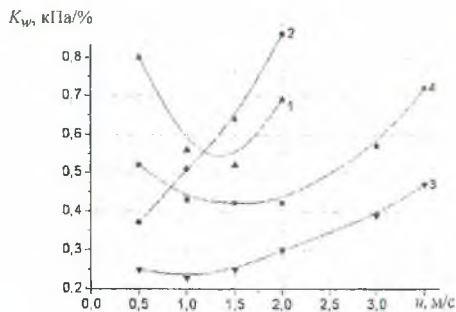


**Рисунок 20 – Распределение жидкости в цилиндре**

Активными являются статические суперкавитирующие аппараты, каверна в которых создается посредством обтекания неподвижных преград в виде конусов, сфер, пластин. В качестве объектов исследований принято четыре кавитатора такого типа: конический, лопастной, винтовой и пластинчатый. Отличительной особенностью кавитаторов являлось наличие элементов для дополнительной закрутки потока. Идея заключалась в том, что при закрутке можно создать стабильную каверну при меньших скоростях жидкости, а соответственно, снизить энергозатраты.

В качестве модельной среды для проведения экспериментальных исследований выбрана 1%-ная асбестовая суспензия. В процессе исследований определялись гидравлическое сопротивление и эффективность распушки асбеста. Экспериментальные исследования показали, что гидравлическое сопротивление всех кавитаторов возрастает с увеличением скорости жидкости. Наибольшее гидравлическое сопротивление имеет конический кавитатор. Значительно меньше его величина для пластинчатого кавитатора, который повышает общее гидравлическое сопротивление системы не более чем на 10 кПа. Степень распушки асбеста для всех кавитаторов возрастает с увеличением скорости жидкости в трубопроводе, и ее изменение носит экспоненциальный характер. Все кавитаторы за один проход повышают степень распушки на 15-25%. Время обработки в циклическом режиме по её доведению до требуемой 90%-ной величины сокращается примерно вдвое. Сравнение кавитаторов дает преимущества конструкциям с закруткой потока. Это подтверждает предположение о том, что эффект разрушения связей между волокнами достигается не только за счет кавитационного воздействия, но и за счет градиента скоростей и турбулентных пульсаций в вихрях.

Выбор оптимальной конструкции кавитатора проводился по величине удельных энергозатрат, представленных в виде энергетического критерия.



1 – конический; 2 – лопастной; 3 – винтовой;  
4 – пластинчатый

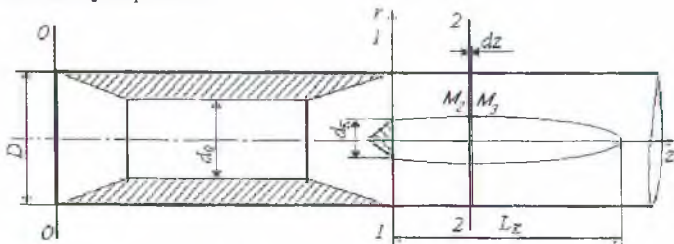
**Рисунок 21 – Зависимость энергетического критерия от скорости жидкости в трубопроводе для разных типов кавитаторов**

Зависимость энергетического критерия  $K_w$  от скорости жидкости показана на рисунке 21. По этим зависимостям можно не только выбрать наиболее рациональную конструкцию кавитационного диспергатора, но и определить оптимальную скорость жидкости в нем. Так для распушки асбеста выбран пластинчатый кавитатор, а для разрушения агломератов алюминиевой лудры – более энергонапряженный конический. По фотографиям на рисунке 22 видно, что при обработке в этом кавитаторе агломераты практически полностью разрушаются.



**Рисунок 22 – Результат обработки алюминиевой суспензии в ССКА (увеличено в 100 раз): а) до обработки; б) после обработки**

Важным моментом является определение геометрических соотношений отдельных элементов кавитатора и кавитационной установки в целом. Основная задача при этом заключается в недопущении эрозионного разрушения элементов конструкции. Отсюда возникает необходимость определения размеров каверны (рисунок 23) и длины пробега кавитационных пузырьков.



**Рисунок 23 – Расчетная схема для определения длины каверны**

На основе уравнений неразрывности, Бернулли и изменения кинетической энергии для элементарного объема жидкости составлены математические модели для осевого и закрученного (34) потоков

$$\begin{cases} u_r = \sqrt{\frac{4\pi \cdot r \cdot \sigma^*}{\rho \cdot Q} \cdot \frac{dz}{dt} + 2 \frac{p_z - p_k}{\rho} - 2 \frac{u_\phi^2}{r}} \cdot dr \\ u_z = \frac{4Q}{\pi \cdot (D^2 - 4r^2)} \\ \frac{dr}{dt} = u_r; \frac{dz}{dt} = u_z; \frac{d\phi}{dt} \cdot r = u_\phi \end{cases} \quad (34)$$

где  $u_r$ ,  $u_\phi$ ,  $u_z$  – проекции скорости жидкости на оси координат, м/с;  $p_z$ ,  $p_k$  – давление в потоке (сечение 2-2) и в каверне, Па;  $\sigma^*$  – поверхностное натяжение, Н/м;  $Q$  – расход жидкости, м<sup>3</sup>/с.

Уравнение осевого потока отличается отсутствием члена, включающего тангенциальную скорость  $u_\phi$ .

Для кавитационной установки с диаметром циркуляционного трубопровода 35 мм проведен расчет параметров каверны по обоим моделям, рисунок 24.

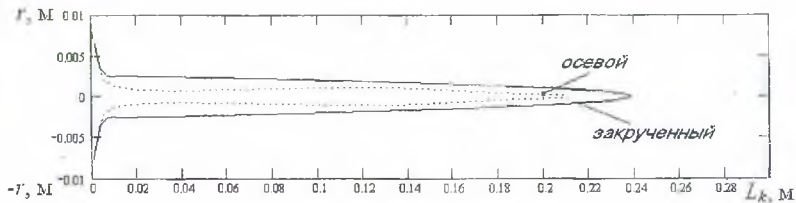


Рисунок 24 – Форма каверны

Расчеты подтвердили предположение о стабилизации каверны при закрутке потока за счет дополнительного действия инерционных центробежных сил. Инерционный фактор при этом может достигать значений  $\Phi=50-250$ , что ещё раз подтверждает вывод о влиянии инерционных сил через увеличение градиента скорости в вихрях на эффективность разрушения.

Для определения длины пробега коллапсирующих кавитационных пузырьков использовано полученное Левковским уравнение движения сферической каверны:

$$R \cdot \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \cdot \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{p - p_\infty}{\rho} \quad (35)$$

где  $p$ ,  $p_\infty$  – давление на границе пузырька и в потоке жидкости;  $R$  – радиус пузырька, м.

Давление на границе каверны зависит от давления внутри нее, действия вязких касательных напряжений и сил поверхностного натяжения. С учетом этого уравнение (35) преобразуется к виду:

$$R \cdot \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \cdot \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{1}{\rho} \cdot \left( p_{II} - 4 \cdot \mu \cdot \frac{u_r}{R} - \frac{2 \cdot \sigma^*}{R} - p_{\infty} \right) \quad (36)$$

Решение полученного уравнения численными методами с помощью ЭВМ позволяет определить время от начала роста до момента схлопывания кавитационных пузырьков, а, зная скорость и направление движения, можно определить длину их пробега и диапазон кавитационного воздействия в рабочем объеме аппарата.

По результатам исследований, приведенных в этой главе, можно констатировать, что доказана перспективность использования кавитационных аппаратов для диспергирования материалов с непрочными связями, а методика расчета параметров кавитационных течений позволяет проектировать кавитационные установки с оптимальными геометрическими соотношениями.

**В седьмой главе** представлены данные по практической реализации результатов диссертационной работы. Под реализацией или внедрением понимались расчет и проектирование оптимизированных конструкций агрегатов, их промышленные испытания и практическое использование в конкретных технологических процессах. Оценивая таким образом все объекты, рассмотренные в работе, можно утверждать, что исследования каждого из них имеют логические завершения в виде практической реализации в каком-то направлении. Так проведены промышленные испытания среднеходной мельницы на ОАО «Белгипс» на стадии помола гипсового вяжущего, показавшие возможность использования этих агрегатов для указанного процесса. Разработано два технических проекта промышленной среднеходной валковой мельницы производительностью 2 т/ч для ООО «Форвард» и ОДО «Ламел-777». В перспективе планируется их изготовление и внедрение в производство.

Мельница ударного действия (дисмембратор) испытана в процессе механической активации цемента на АП МКСИ. Испытания показали возможность использования этого агрегата для активации вяжущих веществ. Дисмембратор производительностью до 15 т/ч, рассчитанный по методике автора, внедрен в производстве тонкодисперсного строительного гипса на ОАО «Хабезский гипсовый завод» (Карачаево-Черкесская Республика, Россия). Использование дисмембратора позволило повысить дисперсность до  $R_{02} \leq 10\%$ , стабилизировать гранулометрический состав и снизить удельные энергозатраты. Разработана, изготовлена помольно-классифицирующая установка дезинтеграторного типа для измельчения яблочного жмыха, которая устойчиво работает на ОДО ИРБ «Белрад». Проведено обследование установки для измельчения газетной макулатуры, используемой в качестве армирующей добавки для асфальтобетона. Она включает два агрегата ударного действия: роторную ножевую дробилку и молотковую мельницу. Пересчет производительности агрегатов с использованием методики, разработанной автором, дал возможность отказаться от установки дополнительной мельницы и получить за счет этого

экономический эффект. Внедрение планетарной мельницы на РУП «Гродненский завод медицинских препаратов» для измельчения некондиционных таблеток аскорбиновой кислоты позволило решить вопрос утилизации отходов, снизить расход сырьевых компонентов. Гидродинамические кавитационные диспергаторы внедрены на ОАО «Красносельскстройматериалы» для распушки асбеста и на ЗАО «Могилевский комбинат силикатных изделий» (два диспергатора) для разрушения агломератов алюминиевой пудры. Совместно с ОДО «ЮРЛЕ-К» внедрено два кавитационных диспергатора, один из которых применен для получения органических удобрений на основе биогумуса, а второй – жидко-вязких кормовых смесей. Использование в реальных технологических процессах всех кавитационных диспергаторов привело к повышению качества готовой продукции. Общий экономический эффект от внедрения разработок составил 79 млн. BYR (790 тыс. RUR).

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. На основе анализа современного состояния технологии и техники дезинтеграции определены перспективы и тенденции совершенствования процессов измельчения и измельчающих агрегатов. Разработана новая методология исследования и оптимизации высокоскоростных измельчителей, основанная на изучении движения рабочих органов машин, несущей среды и измельчаемого материала. Введен обобщающий инерционный фактор, определяющий влияние инерционных сил на процесс разрушения материала, а также устанавливающий взаимосвязь между величиной и направлением действия силовых факторов и значением разрушающих напряжений. Для транспортировки и усталостного разрушения материала его значение  $\Phi < 50$ , для силового тонкого измельчения  $\Phi = 50-200$ , сверхтонкого –  $\Phi > 200$ .

2. Составлены уравнения движения измельчаемого материала по размольной тарелке среднеходной мельницы с учетом инерционных сил и силы трения между частицами, в результате решения которых удалось определить оптимальную частоту вращения тарелки из условий гарантированного попадания материала под валки, скорость и траекторию движения частиц измельченного продукта на сходе с тарелки. На основе решения системы дифференциальных уравнений, описывающих движения частиц под воздействием газового потока, и с учетом истинного распределения скорости газа, замеренной экспериментально, определена их траектория в сепарационной зоне мельницы. Знание траектории движения частиц позволило предложить новое сепарационное устройство, изменяющее ее таким образом, что исключается провал материала под тарелку и повышается эффективность сепарации.

3. Предложена модель для определения энергозатрат на разрушение материала между валком и тарелкой, учитывающая его физические свойства, изменение степени измельчения и удельной поверхности за один проход валка. По экспериментально замеренной величине гидравлического

сопротивления мельницы в комплексе с сепаратором определены энергозатраты на пневмотранспорт измельченного продукта, установлен оптимальный диапазон скорости газа в сепарационной зоне и способ регулирования зернового состава. Совокупность теоретических и экспериментальных исследований дала возможность оптимизировать конструктивные и технологические параметры, обеспечивающие минимизацию энергозатрат на проведение процесса помола.

4. Разработана схема замкнутого цикла помола применительно к среднеходным мельницам и ее математическое описание, которое при использовании методов нелинейного программирования привело к созданию алгоритма определения максимальной производительности для любого ее типоразмера при оптимальных значениях эффективности сепарации, кратности циркуляции измельченного продукта и максимальной степени измельчения. Указанный алгоритм пригоден для оптимизации параметров среднеходных и быстроходных мельниц, непрерывного действия, работающих в замкнутом цикле.

5. Экспериментально подтверждена высокая эффективность и возможность использования быстроходных ударных измельчителей, в частности дезинтеграторного типа, для процессов механической активации и измельчения материалов органического происхождения. Одновременно показана невозможность получения тонкодисперсного продукта за один проход через зону разрушения, что стало импульсом для создания новых конструкций измельчителей с компактным встроенным классификатором. Дана оценка влияния инерционных сил на разрушающую способность ударных элементов и на распределение материала при подходе к ним. Неравномерность распределения представлена в виде коэффициента загрузки. Предложен метод определения коэффициента загрузки, основанный на решении уравнений движения частиц исходного продукта в загрузочном патрубке и в пространстве перед ударными элементами с учетом их концентрации в аэросмеси, дающий возможность рассчитать максимально возможную производительность в зависимости от размеров исходного продукта, условий его входа в зону разрушения, геометрических размеров и скорости вращения ротора.

6. Показана возможность интенсификации шарового помола за счет изменения траектории и скорости движения мелющих тел, которое можно реализовать в быстроходных центробежно-шаровых и планетарных мельницах. Предложена физическая модель движения мелющих тел и частиц измельчаемого материала на отдельных участках размольной камеры указанных мельниц с оценкой всех силовых факторов, в том числе сил взаимодействия между частицами материала и сил инерции. Составлена система дифференциальных уравнений, описывающая перемещение элемента загрузки по плоскому днищу, конической поверхности, вертикальной стенке и с ее использованием рассчитана максимально и минимально возможная высота камеры, определенная по высоте подъема мелющего тела и измельчаемых частиц соответственно. Для оценки поведения загрузки в целом в вертикальной размольной камере планетарной мельницы она представлена в виде сплошной среды (жидкости) и методом

интегрирования уравнении поверхности уровня получена наглядная пространственная картина ее распределения.

7. Проведен теоретический анализ движения мелющих тел в горизонтальной планетарной мельнице и определены границы основных режимов их движения: водопадного и центрифугального. По нулевому значению реакции связи определены условия отрыва мелющих тел от стенок барабана и впервые установлена ее зависимость от углов поворота водила и барабана, представленная в виде поверхности, сечение которой плоскостью нулевой реакции связи дало возможность построить линии уровня, ограничивающие области возможного отрыва мелющих тел. При совместном решении уравнения движения мелющих тел после отрыва и уравнения окружности барабана, вовлеченного в планетарное перемещение, определены координаты его отрыва и соприкосновения со стенками барабана, по которым рассчитана высота падения мелющего тела, являющаяся определяющим фактором ударного воздействия на материал. Предложен метод определения характерных зон движения загрузки: скольжения, отрыва и безотрывного движения с учетом взаимодействия измельчающих тел и установлена зависимость изменения границ этих зон от скоростных и конструктивных параметров, в результате чего сделано предположение о влиянии изменения границ на эффективность помола. Эти предположения обоснованы расчетными значениями инерционного фактора и подтверждены экспериментальными исследованиями. Установлено, что в центрифугальном режиме нормальные и касательные напряжения от действия инерционных сил превышают предел прочности материала на сжатие и срез, что приводит к существенному увеличению эффективности измельчения.

8. Дан анализ перспектив использования гидродинамической кавитации для диспергирования материалов в водной среде. Проведены экспериментальные исследования различных конструкций кавитаторов с дополнительной закруткой потока по эффективности диспергирования и энергетике процесса, показавшие возможность их использования для обработки волокнистых материалов, разрушения агломерированных структур. По удельным энергозатратам выбраны наиболее рациональные конструкции кавитаторов и определен оптимальный диапазон изменения скорости жидкости в них. На основании уравнения изменения кинетической энергии, уравнений Бернулли и неразрывности получена математическая модель, по которой рассчитаны геометрические параметры каверны для различных скоростей потока и габаритных размеров кавитаторов и показано влияние инерционных сил на стабилизацию формы каверны. С использованием уравнения движения сферической каверны определен максимальный радиус кавитационного пузырька, время его существования и длина пробега. По параметрам каверны и длине пробега пузырьков установлены оптимальные размеры кавитаторов и участков трубопровода после них, при которых предотвращается эрозионный износ металлических частей гидродинамических диспергаторов.

9. Модели, методы, алгоритмы расчета и оптимизации, представляющие основные научные результаты диссертации, прошли апробацию при разработке и проектировании опытно-промышленных и промышленных измельчающих агрегатов, которые внедрены в производство.



**Основные результаты работы представлены в следующих публикациях**

*Монография:*

1. Вайтехович, П.Е. Интенсификация и моделирование процессов диспергирования в поле инерционных сил / П.Е. Вайтехович. – Минск: БГТУ, 2008 – 220 с.

*Статьи:*

2. Вайтехович, П.Е. Тенденции и перспективы развития техники и технологии дезинтеграции / П.Е. Вайтехович Труды БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорганических веществ. – 2008. – Вып. XVI. – С. 106–112.

3. Францкевич, В.С. Оптимизация движения материала по размольной тарелке среднеходной мельницы / В.С. Францкевич, П.Е. Вайтехович // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорганических веществ. – 2001. – Вып. IX. – С. 109–113.

4. Францкевич, В.С. Определение траектории движения материала по размольной тарелке валково-тарельчатой мельницы / В.С. Францкевич, П.Е. Вайтехович // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорганических веществ. – Минск, 2007. – Вып. XV. – С. 149–152.

5. Францкевич, В.С. Моделирование движения материала в сепарационной зоне валковой мельницы / В.С. Францкевич, П.Е. Вайтехович // Химическая промышленность. – 2004. – Т. 81. – № 6. – С. 295–300.

6. Вайтехович, П.Е. Исследование влияния рабочих параметров валковых мельниц на удельные энергозатраты / П.Е. Вайтехович, В.С. Францкевич // Строительная наука и техника. – 2007. – № 2. – С. 21–24.

7. Вайтехович, П.Е. Энергетика процесса измельчения в мельницах раздавливающего типа / П.Е. Вайтехович, В.С. Францкевич // Строительная наука и техника. – 2008. – № 4. – С. 18–21.

8. Вайтехович, П.Е. Оптимизация технологических параметров энергоэффективной валковой мельницы / П.Е. Вайтехович, В.С. Францкевич // Энергетика – Изв. высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2004. – № 6. – С. 59–64.

9. Костюнин, Ю.М. Исследование сухого способа активации цемента с целью улучшения строительно-технических свойств бетона / Ю.М. Костюнин, П.Е. Вайтехович // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорганических веществ. – 2000 – Минск. – Вып. VIII. – С. 244–248.

10. Мурог, В.Ю. Определение энергозатрат на домол цемента в дисмембраторе / В.Ю. Мурог, П.Е. Вайтехович, О.А. Петров // Строительные материалы, 2007. – № 11. – С. 40–41.

11. Мурог, В.Ю. Влияние использования активированного цемента на прочностные характеристики бетонных изделий / В.Ю. Мурог, П.Е. Вайтехович, Ю.М. Костюнин // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорганических веществ. – 2002 – Минск. – Вып. X. – С. 233–237.

12. Мурог, В.Ю. Влияние домола цемента на прочность бетонных изделий / В.Ю. Мурог, П.Е. Вайтехович // Строительные материалы. – 2004. – № 6. – С. 36–38.

13. Мурог, В.Ю. Помольно-классифицирующие мельницы

дезинтеграторного типа / В.Ю. Мурог, П.Е. Вайтехович, Д.Н. Боровский // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорганич. в-в. – 2008 – Минск. – Вып. XVI. – С. 113–117.

14. Мурог, В.Ю. Расчет производительности измельчителей дезинтеграторного типа / В.Ю. Мурог, П.Е. Вайтехович, Ю.М. Костюнин // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорганических в-в. – 2003. – Вып. XI. – С. 204–211.

15. Вайтехович, П.Е. Производительность измельчающего агрегата дезинтеграторного типа / П.Е. Вайтехович, В.Ю. Мурог // Строительная наука и техника – 2009. – С. 77–81

16. Вайтехович, П.Е. Определение важнейших параметров центробежно-шаровых мельниц / П.Е. Вайтехович, В.С. Францкевич, Г.М. Хвесько // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2007. – №10. – С. 3–5.

17. Вайтехович, П.Е. Определение критических скоростей вращения планетарных мельниц / П.Е. Вайтехович, А.В. Вавилов, Г.М. Хвесько // Вестник БНТУ, 2003. – №2. – С. 34–39.

18. Вайтехович, П.Е. Кинематика планетарных мельниц с внутренней обкаткой / П.Е. Вайтехович // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорганич. в-в. – Минск, 2002. – Вып. X. – С. 217–222.

19. 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.

20. 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. 384-387).

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

22. 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 неорганич. в-в. – Минск, 2002. – Вып. X. – С. 223–225.

23. 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.

24. Вайтехович, П.Е. Движение мелющих тел после отрыва от стенок барабана планетарной мельницы / П.Е. Вайтехович, Г.М. Хвесько, Д.В. Семененко // Теор. основы хим. технологии. – 2005. – Т. 39. – №3. – С. 334–336 (Vaitekhovich, P.E. Motion of Grinding Bodies after Their Sepation from the Surface of a Drum of a Planetary Mill / P.E. Vaitekhovich, G.M. Khves'ko, D.V. Semenenko // Theoretical Foundation of Chemical

Engineering. – 2005. – Vol. 39, No. 3 – pp. 313-315).

25. Вайтехович, П.Е. Определение высоты падения мелющих тел в планетарных мельницах / П.Е. Вайтехович // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2006. – №11. – С. 7–8. (Vaitekhovich, P.E. Determination of the Drop Height of Grinding Bodies in Planetary Mills / P.E. Vaitekhovich // Chemical and Petroleum Engineering. – 2006. – Vol.42, No.11-12. – pp.618-622)

26. 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).

27. 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).

28. Семененко, Д.В. Определение эффективности планетарных мельниц с внешней обкаткой / Д.В. Семененко, П.Е. Вайтехович // Труды БГТУ. Сер.III, Химия и технология неорган. в-в. – Минск – Вып.XIII. – 2005. – С. 135–137.

29. 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. – 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).

30. Вайтехович, П.Е. Распределение жидкости в вертикальном цилиндре с планетарным движением / П.Е. Вайтехович, Д.В. Семененко, Н.Н. Сидоров // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2007. – №1. – С. 11–12. (Vaitekhovich, P.E. Distribution of Liquid in a Vertical Cylinder with Planetary Motion / P.E. Vaitekhovich, D.V. Semenenko, N.N. Sidorov // Chemical and Petroleum Engineering. – 2007. – Vol. 43, No. 1-2, pp. 15-19).

31. Круглов, И.И. Исследование влияния кавитации на процесс распушки асбеста / И.И. Круглов, П.Е. Вайтехович // Труды БГТУ. Сер.III, Химия и технология неорган. в-в. – Минск – Вып. VII. – 1999. – С. 38–44.

32. Вайтехович, П.Е. Исследование и оптимизация гидродинамических кавитационных диспергаторов / П.Е. Вайтехович, О.А. Петров // Труды БГТУ. Сер.III, Химия и технология неорган. в-в. – Минск – Вып.VIII. – 2000. – С. 237–244.

33. Петров, О.А. Исследование и моделирование гидродинамических кавитаторов / О.А. Петров, П.Е. Вайтехович // Химическая промышленность сегодня. – 2003. – №12. – С. 52–56.

34. Петров, О.А. Статические суперкавитаторы для гидродинами-

ческой обработки материалов / О.А. Петров, П.Е.Вайтехович // Химическая промышленность. – 2004. – Т. 81. – №2. – С. 68–72.

35. Петров, О.А. Влияние концентрации суспензии на параметры каверны в кавитационных аппаратах / О.А. Петров, П.Е. Вайтехович // Труды БГТУ. Сер.III, Химия и технология неорган. в-в. – Минск, 2002.– Вып. X. – С. 226–229.

36. Вайтехович, П.Е. Некоторые направления применения суперкавитирующих аппаратов. Результаты исследований / П.Е. Вайтехович, О.А. Петров // Строительная наука и техника, 2007. – №4. – С. 20–25.

37. Петров, О.А. Математическая модель расчета параметров каверны // О.А. Петров, П.Е. Вайтехович // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз-техн. наук. – 2004. – №2. – С. 35–38.

38. Вайтехович, П.Е. Расчет параметров каверны в кавитационном аппарате / П.Е. Вайтехович, О.А. Петров, А.М. Волк // Труды БГТУ. Сер.III, Химия и технология неорган. в-в. – Минск – Вып. IX. – 2001. – С. 106–109.

39. Петров, О.А. Определение размера и длины пробега кавитационных пузырьков / О.А. Петров, П.Е. Вайтехович // Труды БГТУ. Сер.III, Химия и технология неорган. в-в. – Минск – Вып. XI. – 2003. – С. 195–198.

40. Мурог, В.Ю. Технология получения целлюлозной добавки для щебечно-мастичного асфальтобетона / В.Ю. Мурог, П.Е. Вайтехович, О.А. Петров // Труды БГТУ. Сер.III, Химия и технология неорган. в-в. – Минск – Вып. XIV. – 2006. – С. 126–128.

41. Семененко, Д.В. Определение мощности привода планетарных мельницах / Д.В. Семененко, П.Е. Вайтехович // Труды БГТУ. Сер.III, Химия и технология неорган. в-в. – Минск – Вып. XIV. – 2006. – С. 133–136.

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

43. 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 – Минск. – Вып. XVII. – С. 163–166.

44. 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 неорганических веществ. – 2010. – Минск. – Вып. XVIII. – С. 167-171.

45. 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.

#### *Материалы и тезисы конференций:*

46. Вайтехович, П.Е. Определение оптимальной частоты вращения размольной тарелки среднеходной мельницы / П.Е. Вайтехович, В.С. Францкевич // «Moderní vymoženosti vedy – 2009»: Materialy v mezinárodní vědecko-praktická conference, Praha, 27.01 – 5.02.09 /Publishing House «Education and Science»; редкол.: Cernak Z. [и др.] – Praha, 2009 – S. 13–16.

47. Францкевич, В.С. Математическое моделирование движения частицы материала в валковой среднеходной мельнице / В.С. Францкевич, П.Е. Вайтехович // «Интерстроймех-2002»: материалы междунар. н-т конф. Могилев, 23-24 мая 2002 г. / Мог. госуд. технич. ун-т; редкол. Сазонов И. С. [и др.] – Могилев, 2002 – С. 388–389.

48. Францкевич, В.С. Изучение движения газовых потоков в сепарационной зоне валковой мельнице / В.С. Францкевич, П.Е. Вайтехович // Новейшие достижения в области импортозамещения в хим. Промышленности и пр-ве стройматериалов: материалы междунар. конф. Минск, 26-28 ноября 2003 г. / УО «БГТУ»; редкол.: Жарский И.М. [и др.] – Минск: БГТУ, 2003 – С. 125–127.

49. Мурог, В.Ю. Механоактивация вяжущих веществ в активаторах дезинтеграторного типа / В.Ю. Мурог, П.Е. Вайтехович // Центробежная техника-высокие технологии: материалы междунар. конф. Минск, 12-14 ноября 2003 г. / НПО «Центр», редкол.: Воробьев В.В. [и др.] – Минск: НПО Центр, 2003 – С. 75–76.

50. Мурог, В.Ю. Получение тонкодисперсного бетаина гидроксида дезинтеграторным способом / В.Ю. Мурог, П.Е. Вайтехович, Ю.М. Костюнин // Новейшие достижения в области импортозамещения в химической промышленности и производстве строительных материалов: материалы докл. междунар. науч.-техн. конф. – Минск: БГТУ, 2003. – С. 122–124.

51. Вайтехович, П.Е. Анализ кинематических и динамических характеристик планетарных мельниц / П.Е. Вайтехович, Д.В. Гапанюк, Д.В. Семененко // «Интерстроймех-2002»: материалы междунар. н-т конф. Могилев, 23-24 мая 2002 г. / Мог. госуд. технич. ун-т; редкол. Сазонов И. С. [и др.] – Могилев, 2002 – С. 322–323.

52. Семененко, Д.В. Расчет основных характеристик планетарных мельниц / Д.В. Семененко, П.Е. Вайтехович // Центробежная техника-высокие технологии: материалы междунар. конф. Минск, 12-14 ноября 2003 г. / НПО «Центр», редкол.: Воробьев В.В. [и др.] – Минск: НПО Центр, 2003 – С. 117–118.

53. Семененко, Д.В. Особенности движения загрузки в планетарных мельницах с горизонтальным расположением помольных барабанов / Д.В. Семененко, П.Е. Вайтехович // Наука та технології: крок в майбутнє т.5: материалы міжнар. конф. Днепропетровск, 1-15 октября 2007 г. / «Наука та асвіта»; редкол.: Скимов С.В. – Днепропетровск, 2007 – С. 72–74.

54. Семененко, Д.В. Использование планетарных мельниц в химической промышленности для переработки отходов / Д.В. Семененко, П.Е. Вайтехович // Новые технологии рециклинга отходов производства и потребления: материалы междунар. конф. Минск, 24-26 ноября 2004 г. / УО «БГТУ»; редкол.: Жарский И.М. [и др.] – Минск: БГТУ, 2004 – С. 216–218.

55. Семененко, Д.В. Исследование эффективности помола в планетарных мельницах / Д.В. Семененко, П.Е. Вайтехович // Центробежная техника-высокие технологии: материалы междунар. конф. Минск, 12-14 ноября 2005 г. / НПО «Центр», редкол.: Воробьев В.В. [и др.] – Минск:

56. Семененко, Д.В. Эффективность процесса помола в планетарных мельницах с горизонтальным расположением барабанов при водопадном режиме / Д.В. Семененко, П.Е. Вайтехович, Д.В. Юхевич // Научни дни – 2008, т.16, Технология: материалы МНТК. София, 1-15 апреля 2008 г. / ООД «БялГРАД-БГ»; редкол.: Петков М.Т. [и др.] – София, 2008. – С. 59–63.

57. Семененко, Д.В. Снижение энергоемкости процесса помола в планетарных мельницах / Д.В. Семененко, П.Е. Вайтехович // Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии: материалы МНТК, Минск, 19-20 ноября 2008 г. : в 2 ч. / УО «БГТУ»; редкол.: Жарский И.М. [и др.] – Минск БГТУ 2008 - Ч.1. – С. 94–98.

58. Вайтехович, П.Е. Определение высоты размольной камеры в быстроходных шаровых мельницах / П.Е. Вайтехович // Настоящи изследования 2009: материали за V Международна научна практична конференция. София, 17-25 января 2009 г. / ООД «БялГРАД-БГ»; редкол.: Петков М.Т. [и др.] – София, 2009 – С. 22–25.

59. Петров, О.А. Применение гидродинамического аппарата для обработки активного ила / О.А. Петров, П.Е. Вайтехович, О.В. Гурьян // Новейшие достижения в области импортозамещения в хим. промышленности и пр-ве стройматериалов: материалы междунар. конф., Минск, 26 - 28 ноября 2003г. / УО «БГТУ»; редкол.: Жарский И.М. [и др.] – Минск: БГТУ, 2003 – С 493–495.

60. Вайтехович, П.Е. Энергосберегающие технологии измельчения доломита / Вайтехович, О.А., В.С. Франкевич, А.С. Дорогокупец // Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии: материалы МНТК. Минск, 19-20 ноября 2008 г.: в 2 ч. / УО «БГТУ»; редкол.: Жарский И.М. [и др.]. – Минск: БГТУ –Ч.1. – 2008. – С. 22–25.

61. Вайтехович, П.Е. Планетарные мельницы – разработка, исследование и перспективы использования / П.Е. Вайтехович, Д.В. Семененко // Новые технологии в хим. промышленности: материалы междунар. конф. Минск, 20-22 ноября 2002 г: в 2 ч. / УО «БГТУ»; редкол.: Жарский И.М. [и др.]– Минск: БГТУ, 2002 – С. 237–238.

62. Вайтехович, П.Е. Особенности движения измельчающих тел в планетарной мельнице / П.Е. Вайтехович // Архитектурно-строительное материаловедение на рубеже веков: материалы междунар. интернет-конф. Белгород 2002 / Белгород. госуд. технол. академ. строит. Материалов: редкол.: Баженов. Ю.М. [и др.] – Белгород: БГТАСМ, 2002 – С. 23–25.

63. Круглов, И.И. Интенсификация процесса распушки асбеста в скоростном гидропушителе / И.И. Круглов, П.Е. Вайтехович // Высокие технологии и научно-технический прогресс в строительном комплексе Республики Беларусь: тезисы докладов междунар. конф. Минск, 28 сентября 1999 / ГП «НИИСМ» – Минск: НИИСМ, 1999 – С.88.

64. 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.

65. Семененко, Д.В. Влияние геометрических параметров привода планетарной мельницы на размер и характер изменения помольных зон / Д.В. Семененко, П.Е. Вайтехович // *Perspectywieczne opracowania sa nauka i technikami* – 2009: материалы МНТК, Przemysl, 7-15 listopada, 2009 – Przemysl «Nauka i studia» 2009 – Vol.10 – С.25-28.

66. Францкевич, В.С. Модель процесса измельчения в агрегатах раздавливающего типа/ В.С. Францкевич, П.Е. Вайтехович// Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии: материалы междунар. конф. Минск, 24-26 ноября 2010 г./ УО «БГТУ»; редкол.: Жарский И.М. [и др.] – Минск: БГТУ, 2010. – С.94-96.

#### *Патенты:*

67. Валковая мельница: пат.8245 Респ. Беларусь, МПК7 В 02 С 15/04 / В.С. Францкевич, П.Е. Вайтехович, В.С. Володько; заявитель Бел. госуд. технолог. ун-т - № а 20030475; заявл. 30.05.03; опубл. 30.12.04 // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал.уласцінасці.* – 2006. – №3. – С. 62.

68. Дисмембратор со встроенным классификатором: пат. 7952 МПК7 В 02 С 13/22 / В.Ю. Мурог, П.Е. Вайтехович; заявитель БГТУ. - № а 20030154; заявл. 24.02.2003; опубл. 30.09.04 // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал.уласцінасці.* – 2006. – №2. – С.55.

69. Дисмембратор с классифицирующей камерой: пат. 9517 МПК7 В 02 С 13/00 / П.Е. Вайтехович, В.Ю. Мурог; заявитель Бел. госуд. технолог. ун-т. – № а 2004900; заяв. 29.09.2004; опубл. 30.04.06 // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал.уласцінасці.* – 2007. – №4. – С. 73–74.

70. Планетарная мельница: пат. №9757 Респ. Беларусь, МПК7 В 02 С 17/00 / П.Е. Вайтехович, Д.В. Семененко; заявитель Бел. госуд. технолог. ун-т - № а20050517; заявл. 26.05.05; опубл. 28.02.07 // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал.уласцінасці.* – 2007. – №5. – С. 68

71. Планетарная мельница: пат. 11574 МПК7 В 02 С 17/00 / П.Е. Вайтехович, Д.В. Семененко; заявитель Бел. госуд. технолог. ун-т. – № а 20061366; заяв. 29.12.2006; опубл. 30.08.08 // – 2008. – №4. – С.73–74

72. Гидродинамический кавитационный реактор: пат. №6932 Республика Беларусь, МПК D 21 В 1/36/ П.Е. Вайтехович, О.А. Петров; заявитель Бел. госуд. технолог. ун-т. - № а 20011031; заяв. 3.12.2001; опубл. 03.03.05 // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал.уласцінасці.* – 2005. – №1. – С.152.

73. Мельница: пат №12343 Респ. Беларусь, МПК7 В 02 С 17/00/ П.Е. Вайтехович, Н.Н. Сидоров, В.С Францкевич, Д.В. Семененко; заявитель Бел. госудр. технолог. ун-т – № а 20070627; заявл. 24.05.07; опубл. 30.12.2008 // *Афіцыйны біол. / Нац. цэнтр. інтэлектуал. уласнасці.* – 2008. – №2. – С. 55.

Научное издание

**Вайтехович** Петр Евгеньевич

**ПРОЦЕССЫ ЭФФЕКТИВНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В АГРЕГАТАХ  
С ИНЕРЦИОННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА РАЗРУШАЕМЫЙ  
МАТЕРИАЛ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук

Специальность: 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы

(химическая промышленность)

Ответственный за выпуск П.Е. Вайтехович

Подписано в печать 08.04.2011. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 2,3. Уч.-изд. л. 2,4.

Тираж 100 экз. Заказ **109**.

Отпечатано в Центре редакционно-издательских и полиграфических технологий  
учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет».

220006, Минск, Свердлова 13а.

ЛИ № 02330/0549423 от 08.04.2009.

ЛП № 02330/0150477 от 16.01.2009.