

621  
Ф84

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 621.926.3

**ФРАНЦКЕВИЧ**  
**Виталий Станиславович**

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПОМОЛА ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ  
СРЕДНЕЙ ПРОЧНОСТИ В ВАЛКОВО-ТАРЕЛЬЧАТЫХ  
МЕЛЬНИЦАХ С ВОЗДУШНОЙ КЛАССИФИКАЦИЕЙ**

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

по специальности 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

Минск 2007

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

Научный руководитель

кандидат технических наук, доцент  
**Вайтехович П. Е.**,  
УО «Белорусский государственный  
технологический университет»,  
кафедра машин и аппаратов химических  
и силикатных производств

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор  
**Сиваченко Л.А.**,  
УО «Белорусско-Российский универ-  
ситет», кафедра строительного  
дорожных и подъемно-транспортных  
машин и оборудования;

кандидат технических наук, доцент  
**Протасов С.К.**,  
УО «Белорусский государственный тех-  
нологический университет», кафедра  
процессов и аппаратов химических про-  
изводств

Оппонирующая организация

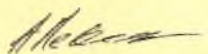
Научно-исследовательское республикан-  
ское унитарное предприятие «НИИСМ»

Защита состоится 18 декабря 2007 г. в 11.00 часов на заседании Со-  
вета по защите диссертаций Д 02.08.02 при УО «Белорусский государст-  
венный технологический университет» (Беларусь, 220006, г. Минск,  
ул. Свердлова, 13а) в аудитории 240 корп. 4. Тел. 226-00-39; факс (017)  
227-62-17, электронная почта: root@bstu/unibel.by/.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке УО «Белорусский го-  
сударственный технологический университет».

Автореферат разослан 14 ноября 2007 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций  
доктор технических наук, доцент



А.А. Левданский

## КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Создание энергосберегающих технологий и оборудования при одновременном снижении их металлоемкости является одной из ключевых задач научно-технического прогресса. Естественно, что при ее решении внимание в первую очередь должно уделяться оборудованию, реализующему технологические процессы, наиболее энергоемкие по своей природе и вносящие преобладающий вклад в промышленное энергопотребление в целом.

В химической промышленности и смежных отраслях (обогащение руд, производство цемента, теплоэнергетика) к таким процессам относится тонкое измельчение различных материалов. Учитывая высокую энергоемкость процесса разрушения материалов, необходимо стремиться к повышению его эффективности путем совершенствования технологии и техники измельчения. Одними из перспективных измельчителей являются валково-тарельчатые мельницы с воздушной классификацией готового продукта, реализующие локализованный подвод энергии к порции размалываемого материала. К их преимуществам можно отнести компактность, относительно небольшой расход энергии на помол, малый износ рабочих органов, низкую инерционность.

Несмотря на очевидные преимущества, помольные агрегаты с валково-тарельчатыми мельницами у нас практически не используются. Это обусловлено отсутствием работ белорусских ученых по комплексному исследованию таких агрегатов, определению их оптимальных конструктивных и технологических параметров, созданию методов расчета. Перечисленные факторы, а также перспективность измельчительных комплексов с валковыми мельницами и необходимость их использования в различных отраслях промышленности нашей страны определили тему настоящего исследования, ее актуальность и основные направления работ.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Связь работы с крупными научными программами, темами.* Исследования, выполненные по теме диссертации, проводились в рамках госбюджетных тем: ГБ 98–018 «Исследование, моделирование и оптимизация процессов диспергирования и механической активации твердых материалов» (№ госрегистрации 19981012, 1998–99 гг.), ГБ 20–029 «Исследование диспергирования и механической активации в сухом состоянии и в водной среде» (№ госрегистрации 2000940, 2000–2001 гг.), 36–01 «Разработка и исследование высокоэффективных машин и аппаратов» (№ госрегистрации 19981012, 2000–2005 гг.), ГБ 26–103 «Разработка теоретических основ процесса диспергирования материалов в агрегатах раздавливающего типа с проточной классификацией и создание на их основе высокоэффективных помольных установок» (№ госрегистрации 20064128, 2006–2010 гг.).

*Цель и задачи исследования.* Целью диссертационной работы являлись оптимизация процесса измельчения в валково-тарельчатых мельницах

БЕЛОРУССКАЯ  
БЕЛОРУССКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

1035 ар.

с воздушной классификацией готового продукта и разработка методики расчета энергосберегающих помольных агрегатов.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1) Установить зависимость дисперсного состава готового продукта и энергозатрат на проведение процесса от частоты вращения размольной тарелки, скорости газа в сепарационном пространстве и параметров воздушных сепараторов в комплексе с валковой мельницей.

2) Разработать методы определения оптимальных конструктивных и технологических параметров помольного агрегата.

3) Создать опытно-промышленный образец агрегата для измельчения материалов средней прочности и провести его промышленные испытания.

Объектом исследования является валково-тарельчатая мельница с воздушной классификацией, предназначенная для тонкого помола хрупких материалов средней прочности. Предмет исследования – процессы измельчения и классификации, реализуемые в помольном агрегате.

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

1. Метод определения скорости и траектории движения материала по размольной тарелке с учетом взаимного трения частиц, дающий возможность установить оптимальный диапазон изменения частоты вращения размольной тарелки при гарантированном попадании материала под валки.

2. Результаты экспериментальных исследований аэродинамики валковой мельницы с тангенциальным вводом воздушного потока, на основании которых возможно прогнозирование характера движения материала в сепарационной зоне мельницы.

3. Метод расчета траектории движения частиц в сепарационной зоне, учитывающий истинное распределение скорости воздушного потока, как по сечению, так и по высоте, позволивший спроектировать устройство возврата крупных частиц на домол, повышающее эффективность сепарации и предотвращающее «провал» материала.

4. Результаты экспериментальных исследований по установлению влияния частоты вращения размольной тарелки, скорости газа в сепарационном пространстве и конструктивных особенностей сепараторов на дисперсный состав готового продукта и энергозатраты, приходящиеся на единицу удельной поверхности.

5. Особенность работы мельницы в замкнутом цикле и способ оптимизации рабочих параметров помольного агрегата, позволивший установить оптимальные значения эффективности классификации и кратности циркуляции для достижения максимальной производительности с учетом необходимой степени измельчения.

6. Рекомендации по расчету и проектированию валково-тарельчатых мельниц с воздушной классификацией, апробированные на реальном помольном агрегате, прошедшем промышленные испытания на ОАО «Белгипс».

**Личный вклад соискателя.** Все результаты работы получены соискателем самостоятельно. Соискатель принимал участие в постановке задач исследования, разработке методик и проведении теоретических и экспериментальных исследований. Им проведен анализ состояния помольной техники в Беларуси и за рубежом, обзор научных работ по исследуемому вопросу, разработана математическая модель движения измельчаемого материала в различных зонах валковой мельницы. Автором спроектирована и изготовлена лабораторная мельница, на которой проведены экспериментальные исследования. Лично автором выполнена обработка и анализ полученных данных, разработаны практические рекомендации по расчету и проектированию валково-тарельчатых мельниц. С использованием этих рекомендаций автором совместно с ОАО «Белтипс» создана опытно-промышленная конструкция агрегата для измельчения твердых материалов средней прочности, сочетающая в себе основные преимущества, выявленные в ходе проделанной работы, и проведены ее успешные промышленные испытания.

**Апробация результатов диссертации.** Результаты исследований докладывались на следующих конференциях: 51-я научно-техническая конференция, БГТУ, Минск, 2000; IV Республиканская научная конференция студентов и аспирантов Беларуси «НИРС-2001», Витебск, 2001; Международная научно-техническая конференция «Интерстроймех-2002», Могилев, 2002; Международная научно-техническая конференция «Новые технологии в химической промышленности», Минск, 2002; Международная Интернет-конференция «Технологические комплексы, оборудование предприятий строительных материалов и стройиндустрии», Белгород, 2003; Международная научно-техническая конференция «Новейшие достижения в области импортозамещения в химической промышленности и производстве строительных материалов», Минск, 2003; Международная научно-техническая конференция «Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии», - Минск, 2005; II Международная научно-практическая конференция «Дни науки-2007», Днепропетровск, 2007.

**Опубликованность результатов.** Основные результаты диссертационной работы изложены в 8 научных статьях, 7 тезисах докладов на конференциях и 4 отчетах по НИР. В 2006 г. получен патент РБ № 8245 «Валковая мельница».

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения и приложения. Общий объем диссертации 173 с., в т.ч. 77 иллюстраций и 6 таблиц на 45 с., приложения на 7 с. и список использованных источников включает 132 наименований на 10 с.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, указана научная новизна, практическая ценность работы, изложены основные по-

ложения, выносимые на защиту, представлены сведения о реализации и апробации работы.

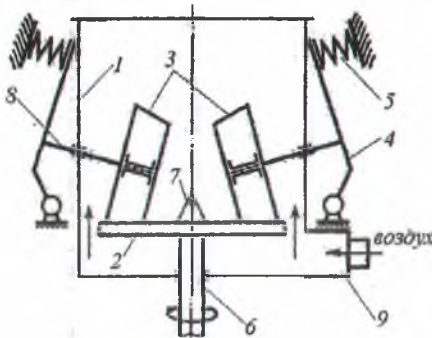
**В первой главе** рассматриваются теоретические основы процесса измельчения в целом и указывается его специфика и особенности для валковых мельниц. Причем основное внимание уделяется энергетике процесса, снижению энергозатрат на его реализацию. Приведен анализ работ по механизму разрушения твердых материалов и особенно хрупких, к которым относится большинство измельчаемых горных пород. Он показал, что снижение прочностных характеристик при увеличении скорости нагружения происходит только до определенного значения, при достижении которого прочность материала не изменяется. Детально проанализирован процесс валкового помола, на основании чего сделан вывод о том, что при валковом измельчении отсутствуют потери энергии на перемещение по сложным траекториям больших масс размольных тел и обрабатываемого материала, обеспечивается более высокая производительность при меньших удельной энергоемкости и износе размольных тел.

Представлен обзор конструкций помольного оборудования, применяемого для измельчения различных материалов. Дана классификация и рассмотрены конструкционные отличия применяемых агрегатов, проанализированы недостатки в их работе. Более подробно рассмотрены основные типы валковых мельниц, особенно с воздушной классификацией.

Проанализированы теоретические разработки в области валкового измельчения. Установлено, что предложенные методики расчета тарельчато-валковых мельниц основаны на эмпирических зависимостях и не дают возможности спроектировать помольный агрегат для измельчения различных минералов. Исследования по измельчению в валково-тарельчатых мельницах угля в Центральном котлотурбинном институте и клинкера в НИИ цемента в конце 80-х гг. были прекращены, и каких-либо основательных выводов и рекомендаций не предложено. Анализ патентной и научно-технической литературы показал, что наиболее проблемным узлом этих мельниц является кольцевой зазор между корпусом и вращающейся тарелкой. Из-за неравномерности распределения воздуха в зазоре возможен провал материала под тарелку, что приводит к нарушению работы мельницы в целом. Подтверждением этого факта является наличие большого числа патентов по устройствам для выгрузки и транспортировки материала из подтарельчатого пространства, а также по установке в кольцевом зазоре дополнительных лопастей, сопел, снижающих возможность провала. Однако все это усложняет конструкцию мельницы, а перекрытие зазора может привести к его забивке и, как следствие, к увеличению гидравлического сопротивления.

Таким образом, валково-тарельчатые мельницы с воздушной классификацией готового продукта требуют не только конструктивного усовершенствования, но и уточнения режимных параметров. Последнее, ввиду сложности процесса, возможно в результате комплексных экспериментальных исследований, а также моделирования и оптимизации стадий помола и классификации.

Во второй главе приведены результаты экспериментальных исследований валковой мельницы с воздушной классификацией продукта. Для проведения исследований была сконструирована и изготовлена лабораторная модель мельницы (рисунок 1). Ее корпус представляет собой стальную обечайку диаметром 250 мм, снабженную патрубком для ввода газа. Диаметр размольной тарелки — 214 мм, а валков — 150 мм. Над размольной камерой мельницы устанавливалась обечайка, в которой монтировались поочередно два типа воздушных проходных сепараторов: центробежный и роторный. Центробежный сепаратор был снабжен поворотными лопастями, а роторный — выполнен в виде колец, с увеличивающимися по ходу газа диаметром, между которыми также закреплены лопасти.



1 — корпус мельницы; 2 — вращающаяся тарелка; 3 — размольные валки; 4 — рычаг; 5 — пружинная система прижатия валков; 6 — приводной вал; 7 — конус; 8 — ось валка; 9 — патрубок ввода воздушного потока.

Рисунок 1 — Валковая мельница

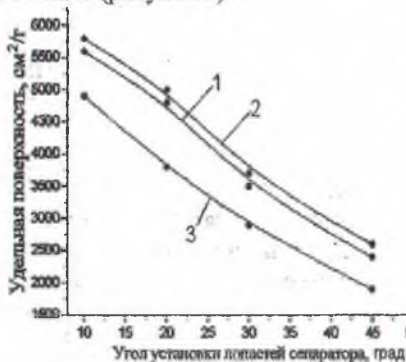
Экспериментальная установка включала газодувку, шнековый питатель, рукавный фильтр и приборы контроля. В процессе опытов изменялись частота вращения тарелки, усилие прижатия валков, угол установки лопастей центробежного и частота вращения роторного сепараторов. Скорость газа на полное сечение мельницы изменялась в диапазоне 1–5 м/с, что соответствует скорости в кольцевом зазоре 7–35 м/с. В качестве исходных материалов для изучения помола использовались цементный клинкер и гипсовый камень с размером фракции 2–

5 мм. При варьировании указанных выше параметров замерялись силовые характеристики привода, гидравлическое сопротивление мельницы и тонина помола. Последняя оценивалась двумя показателями: остатком на сите определенного размера и удельной поверхностью.

На начальном этапе эксперименты проводились на модели мельницы с радиальным вводом газа. Ограниченная высота зоны под тарелкой не дает возможности равномерно распределить воздух по кольцевому зазору. В результате во всем рабочем диапазоне скоростей газа наблюдался провал материала под тарелку. Техническим решением, позволяющим частично избавиться от этой проблемы, явился переход на тангенциальный ввод газа. Все эксперименты в дальнейшем проводились именно при таком вводе.

Экспериментальные исследования при помоле клинкера показали, что размер готового продукта, выводимого из мельницы, определяется, прежде всего, скоростью газа и эффективностью работы сепаратора. Высокое качество полученного порошка подтверждается данными по удельной поверхности. Так, при использовании центробежного сепаратора она мо-

жет достигать 5000–5800  $\text{см}^2/\text{г}$  (рисунок 2). Причем удельная поверхность зависит от скорости газа и легко регулируется углом установки лопастей. Приемлемую для производственных условий удельную поверхность 2500–3500  $\text{см}^2/\text{г}$  можно получить при угле установки 30–35°. При использовании роторного сепаратора удельная поверхность также может быть доведена до 5500  $\text{см}^2/\text{г}$  (рисунок 3).



1 –  $v=1$  м/с; 2 –  $v=2$  м/с; 3 –  $v=3$  м/с.

Рисунок 2 – Зависимость удельной поверхности от угла открытия лопастей

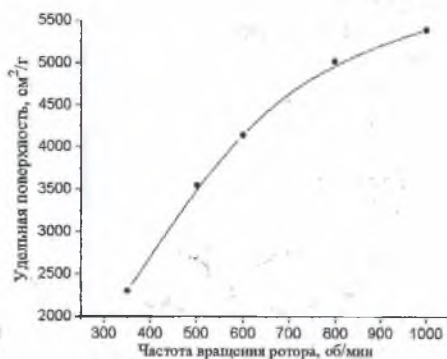


Рисунок 3 – Зависимость удельной поверхности от частоты вращения ротора

Выбор гипсового камня в качестве измельчаемого материала обусловлен подходящими для этих мельниц его прочностными характеристиками и возможными перспективами промышленного использования исследуемого агрегата для помола данного продукта. Исследования проводились в мельнице с центробежным сепаратором при определенном на предыдущем этапе оптимальном угле установки лопастей 30°. Анализ полученных данных по дисперсности готового продукта указывает на большие перспективы применения валково-тарельчатых мельниц для измельчения гипсового камня.

Работа с двумя типами сепараторов показала, что применение центробежных, как наиболее простых в изготовлении и эксплуатации, допустимо в случаях, когда нет необходимости часто изменять тонину помола. С точки зрения плавности и легкости регулировки тонины помола роторные сепараторы становятся более выгодными.

Для выявления особенностей процесса помола в валково-тарельчатой мельнице в открытом цикле без классифицирующего устройства были проведены исследования по размолу цементного клинкера при различном количестве циклов воздействия на материал. Это количество изменялось в диапазоне от 1 до 11. Анализ полученных результатов показал, что необходимая удельная поверхность измельченного продукта (2500–3500  $\text{см}^2/\text{г}$ ) достигается уже при 4–6-кратном воздействии. При дальнейшем увеличении циклов воздействия прирост удельной поверхности замедляется. Так, при изменении кратности воздействия от четырех до восьми он составил менее 10%. Это объясняется увеличением в продукте мелких частиц, поглощающих значительную часть подведенной энергии. При этом кроме

снижения эффективности помола, существенно возрастают удельные энергозатраты на помол. Результаты экспериментов показали технологическую и экономическую нецелесообразность использования валково-тарельчатых мельниц для работы в открытом цикле без сепаратора.

Полные энергозатраты на помол в валково-тарельчатых мельницах складываются из затрат на привод размольных валков и тарелки и на воздушную классификацию и транспортировку продукта, которые можно рассчитывать по гидравлическому сопротивлению.

Установлена зависимость гидравлического сопротивления мельницы от типа ввода воздушного потока, величины кольцевого зазора, типа сепаратора. Переход с радиального ввода газа на тангенциальный привел к снижению гидравлического сопротивления примерно на 10%. Это объясняется более упорядоченным движением газового потока под размольной тарелкой и отсутствием лобового столкновения с корпусом подшипникового узла. Существенное влияние на гидравлическое сопротивление оказывает угол установки лопастей проходного сепаратора. Данные влияния различных конструктивных параметров обобщены в виде эмпирических зависимостей. Следует отметить, что при оптимальных с точки зрения эффективности классификации технологических параметрах (скорость газа 1,5–2 м/с, угол установки лопастей 30–35°) гидравлическое сопротивление мельницы с центробежным сепаратором не превышает 1000 Па, а с роторным — зависит, прежде всего, от частоты вращения ротора и изменяется в пределах 200–1200 Па.

Замеры мощности привода мельницы показали, что она зависит в основном от частоты вращения размольной тарелки и усилия прижатия валков. Установлено влияние этих технологических и конструктивных параметров и определены оптимальные их значения с точки зрения минимизации энергозатрат. На основании полученных результатов сделан вывод, что основной составляющей энергозатрат помольного агрегата является мощность привода размольной тарелки, которая примерно втрое выше мощности привода вентилятора, применяемого для транспортировки готового продукта.

Для определения оптимального диапазона скорости газа был введен энергетический критерий, представляющий собой энергозатраты, приходящиеся на единицу удельной поверхности. Анализ полученной зависимости этого критерия от скорости газа выявил наличие оптимального диапазона скорости газа на сечение мельницы, который лежит в пределах 1,5–2 м/с.

С целью прогнозирования движения твердых частиц в сепарационной зоне исследовано распределение скорости газа по сечению мельницы. Установлен характер изменения осевой и тангенциальной составляющих скорости газа как по радиусу, так и по высоте мельницы. По результатам этих исследований установлено наличие по высоте двух областей течения: области формирования закрученного потока и области относительно стабилизированного течения. Область формирования потока находится непосредственно на входе в мельницу и над тарелкой. Полученные зависимости распределения полей скоростей воздушного потока дали возможность ус-

тановить реальную картину движения газа в зонах помола и сепарации. Численные значения составляющих скорости газа использовались в дальнейшем для расчета траектории движения твердых частиц в сепарационной зоне. Так как наиболее важным является распределение скоростей газа в кольцевом зазоре, то этот участок с высокой точностью описывается эмпирическими уравнениями:

$$\bar{W}_r = a_0 + a_1 \bar{r} - a_2 \bar{r}^2 + a_3 \bar{r}^3 - a_4 \bar{r}^4, \quad (1)$$

$$\bar{W}_z = b_0 + b_1 \bar{r} - b_2 \bar{r}^2 + b_3 \bar{r}^3 - b_4 \bar{r}^4, \quad (2)$$

где  $\bar{r}$  – относительный текущий радиус;  $\bar{W}_r, \bar{W}_z$  – соответственно тангенциальная и осевая относительные скорости газа;  $a_i, b_i$  – эмпирические коэффициенты.

В качестве масштаба при расчете относительных скоростей принята среднерасходная скорость газа, относительного радиуса – радиус аппарата. При составлении эмпирических формул (1), (2) за начало отсчета принят край тарелки ( $\bar{r} = 0,85$ ), поэтому они пригодны для расчета скоростей в диапазоне  $\bar{r} = 0 \dots 0,15$ .

Таким образом, экспериментальные исследования подтвердили высокую эффективность и низкие энергозатраты процесса диспергирования в валково-тарельчатых мельницах и дали ориентир на проведение углубленных теоретических исследований процессов, происходящих в этих агрегатах.

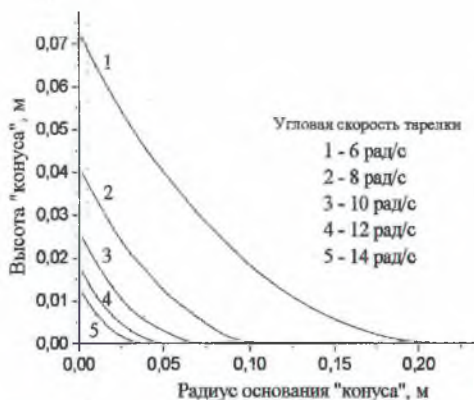
**Третья глава** посвящена моделированию движения измельчаемого материала в зонах помола и сепарации.

При подаче материала в центр тарелки образуется слой определенной толщины, закономерности движения которого описывается с помощью механики сыпучей среды. Далее при движении от центра к периферии высота слоя постепенно уменьшается до значения равного диаметру наименьшей частицы. В идеале частицы должны попадать под валок в один слой без контакта между собой. Используя уравнение Маркмана (3) для расчета высоты слоя частиц в поле инерционных сил, получили профиль распределения сыпучего материала по вращающейся тарелке.

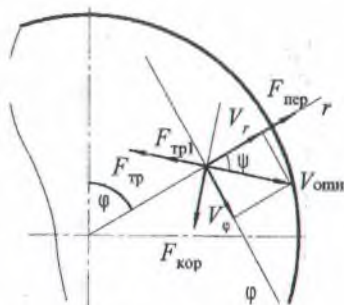
$$z = \left( f_0 + \frac{1}{f_0} \right) \frac{g}{\omega^2 \cdot f_0} \ln \left( \frac{g + f_0 \omega^2 r_{\text{пр}}}{g + f_0 \omega^2 r} \right) - \frac{r_{\text{пр}} - r}{f_0}, \quad (3)$$

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

Анализ полученных данных (рисунок 4) показывает, что с увеличением угловой скорости размеры «конуса» материала уменьшаются, что обусловлено преобладающим воздействием центробежных сил. Представленные графические зависимости имеют практическую значимость при дальнейшем анализе движения материала. С их помощью можно определить радиус тарелки, при котором образуется монослой для конкретного значения размера подаваемых на измельчение частиц.



**Рисунок 4 – Профиль распределения материала по тарелке**



**Рисунок 5 – Схема для расчета траектории движения материала по тарелке**

Для описания движения твердых частиц по размольной тарелке использовалось уравнение динамики несвободной материальной точки. Ввиду сложности движения частиц по тарелке оно было представлено как переносное и относительное: переносное – вращение тарелки с постоянной угловой скоростью  $\omega$ , а относительное – перемещение частицы относительно тарелки. Анализ существующих моделей, описывающих движение материала по вращающейся поверхности, показал, что в процессе их составления трением между соседними частицами пренебрегали. Очевидно, что по различным причинам (стесненное движение на начальном участке, возможное торможение при соприкосновении с размольным валком) контакт между частицами вполне возможен. При этом сила трения между частицами обусловлена давлением, создаваемым инерционными силами. Учитывая действующие на частицу силы инерции (Кориолисову и центробежную), силу трения материала по тарелке  $F_{тр}$  и силу трения  $F_{тр1}$ , возникающую при взаимодействии соседних частиц (рисунок 5), после преобразований, получили систему уравнений (4) относительного движения твердой частицы по вращающейся тарелке в подвижной полярной системе координат.

В результате решения приведенной системы можно найти относительную и полную скорости движения частицы по тарелке, угол отрыва частицы, определить необходимое количество валков и оптимальный диапазон частот вращения размольного органа, построить траекторию движения материала. По результатам расчетов были получены зависимости изменения указанных параметров от частоты вращения тарелки. Оптимальный диапазон частот вращения тарелки определяется из условия гарантированного попадания материала под размольные валки. Пример определения этого диапазона проиллюстрирован на рисунке 6. Участок кривой, расположенный под линией, соответствующей ширине валка, представляет собой диапазон частот с гарантированным попаданием материала под валки.

$$\begin{aligned}
 \frac{d^2 r}{dt^2} - r \cdot \left( \frac{d\varphi}{dt} \right)^2 = & -f \cdot g \cdot \frac{\frac{dr}{dt}}{\sqrt{\left( \frac{dr}{dt} \right)^2 + \left( r \cdot \frac{d\varphi}{dt} \right)^2}} - 2 \cdot \omega \cdot r \cdot \frac{d\varphi}{dt} + \omega^2 \cdot r - \\
 & - f_1 \cdot \left( \frac{\omega^2 \cdot r^2 \cdot \frac{d\varphi}{dt} \cdot \frac{dr}{dt}}{\left( \frac{dr}{dt} \right)^2 + \left( r \cdot \frac{d\varphi}{dt} \right)^2} - 2 \cdot \omega \cdot \frac{dr}{dt} \right) \\
 r \cdot \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + 2 \cdot \frac{dr}{dt} \cdot \frac{d\varphi}{dt} = & -f \cdot g \cdot \frac{r \cdot \frac{d\varphi}{dt}}{\sqrt{\left( \frac{dr}{dt} \right)^2 + \left( r \cdot \frac{d\varphi}{dt} \right)^2}} + 2 \cdot \omega \cdot \frac{dr}{dt} - \\
 & - f_1 \cdot \left( \frac{\omega^2 \cdot r^3 \cdot \left( \frac{d\varphi}{dt} \right)^2}{\left( \frac{dr}{dt} \right)^2 + \left( r \cdot \frac{d\varphi}{dt} \right)^2} - 2 \cdot \omega \cdot r \cdot \frac{d\varphi}{dt} \right)
 \end{aligned} \quad (4)$$

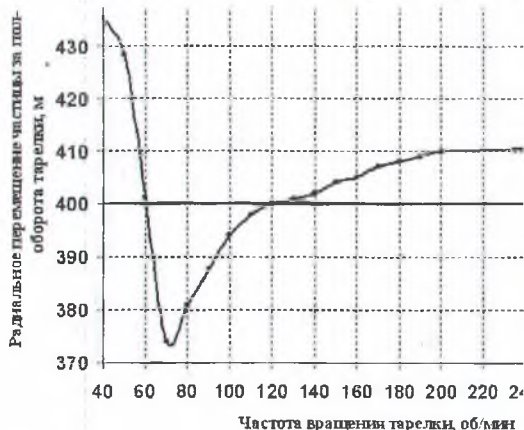
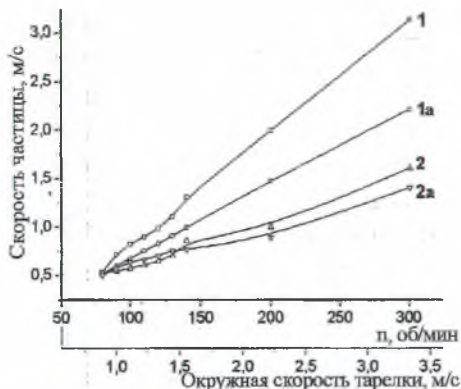


Рисунок 6 — Зависимость радиального перемещения частицы от частоты вращения тарелки

Результаты решения системы уравнений (4) с учетом и без силы взаимного трения частиц показали, что существенное влияние на параметры движения материала эта сила оказывает только при высокой частоте вращения (рисунок 7). Для рабочего диапазона частоты вращения размольной тарелки валково-тарельчатых мельниц влияние силы взаимного трения частиц в расчетах можно не учитывать.

Следующий этап работы заключался в изучении характера движения частиц

в кольцевом зазоре и в сепарационном пространстве над тарелкой. Специфика движения частиц заключается в том, что на выходе с тарелки они имеют определенные скорость и направление. Частицы подхватываются потоком газа, который движется по спиралеобразной траектории, в направлении, перпендикулярном их перемещению. Задача исследования движения частиц состояла в определении их траектории в сепарационном пространстве и особенно вы-



1, 1а — относительная скорость частицы без учета и с учетом силы трения соответственно;  
2, 2а — полная скорость частицы без учета и с учетом силы трения соответственно

**Рисунок 7 — Изменение скоростей частицы от частоты вращения тарелки**

соты, на которой происходит соприкосновение частицы со стенкой корпуса, что важно для конструктивного усовершенствования мельницы. Сепарационная зона должна быть оформлена так, чтобы измельченные частицы не долетали до стенок корпуса над кольцевым зазором.

После отрыва от тарелки частица попадает в кольцевой зазор и движется под действием сил тяжести и инерции (рисунок 8). Одновременно на нее воздействует сила аэродинамического давления, которая рассчитывалась по формуле:

$$\bar{F}_B = \frac{1}{8} \cdot k_\phi \cdot c \cdot \rho_B \cdot \pi \cdot d^2 \cdot |\bar{W} - \bar{V}| \cdot (\bar{W} - \bar{V}), \quad (5)$$

где  $\bar{W}$  — скорость воздушного потока в кольцевом зазоре, м/с;  $c$  — коэффициент аэродинамического сопротивления;  $\rho_B$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $d$  — диаметр частицы, м;  $k_\phi$  — коэффициент формы частицы.

Коэффициент аэродинамического сопротивления определялся по формуле:  $c = \frac{24}{Re} (1 + 0,17 Re^{2/3})$ . (6)

Движение частиц в закрученном потоке обычно рассматривается в цилиндрической системе координат. Их полная скорость в этом случае будет характеризоваться тремя составляющими: радиальной —  $V_r$ , тангенциальной —  $V_\tau$ , осевой —  $V_z$ . В проекциях на оси цилиндрической системы координат с учетом формул (5, 6), уравнения движения твердой частицы в закрученном потоке имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{dV_r}{dt} = 18 \frac{k_\phi \rho_B}{d^2 \rho_M} (W_r - V_r) \left( 1 + 0,17 \left( \frac{d \sqrt{(W_r - V_r)^2 + (W_\tau - V_\tau)^2 + (W_z - V_z)^2}}{v} \right)^{\frac{2}{3}} \right) v + \frac{V_\tau^2}{R}, \\ \frac{dV_\tau}{dt} = 18 \frac{k_\phi \rho_B}{d^2 \rho_M} (W_\tau - V_\tau) \left( 1 + 0,17 \left( \frac{d \sqrt{(W_r - V_r)^2 + (W_\tau - V_\tau)^2 + (W_z - V_z)^2}}{v} \right)^{\frac{2}{3}} \right) v - \frac{2V_r V_\tau}{R}, \\ \frac{dV_z}{dt} = 18 \frac{k_\phi \rho_B}{d^2 \rho_M} (W_z - V_z) \left( 1 + 0,17 \left( \frac{d \sqrt{(W_r - V_r)^2 + (W_\tau - V_\tau)^2 + (W_z - V_z)^2}}{v} \right)^{\frac{2}{3}} \right) v - g \end{cases} \quad (7)$$

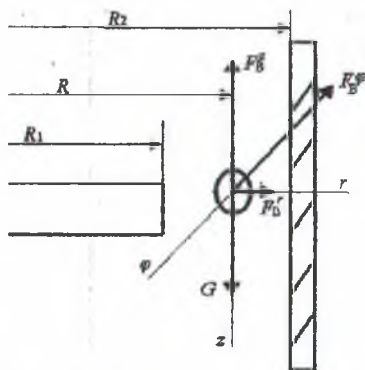


Рисунок 8 – Расчетная схема

где  $W_r$ ,  $W_t$ ,  $W_z$  – соответственно радиальная, тангенциальная и осевая скорости движения воздушного потока в кольцевом зазоре мельницы, м/с;  $R$  – текущий радиус, м.

В качестве начальных условий принимались координаты и величина скорости движения частицы на выходе с тарелки. Скорость газа рассчитывалась по формулам (1), (2). Решая систему дифференциальных уравнений движения твердых частиц в газовом потоке, определили численные значения координат, а также тангенциальной, радиальной и осевой скоростей движения частицы измельченного материала в сепарационной зоне. По полученным данным установлено влияния скорости воздушного потока на полную скорость частицы.

С точки зрения эффективности сепарации и предотвращения провала твердых частиц под тарелку важным является изменение радиальной и осевой координаты движения частиц над кольцевым зазором. По этим координатам можно определить высоту полета частиц, при которой они достигнут стенки корпуса мельницы. Частицы, соприкоснувшиеся со стенкой, где скорость газа близкая к нулю, трудно транспортировать в зону сепарации, и они могут попасть под тарелку. Для предотвращения провала и увеличения эффективности сепарации было предложено и рассчитано с использованием разработанной модели новое устройство, выполненное в виде прикрепленного основанием к корпусу мельницы усеченного конуса, к верхней части которого присоединено тороидальное кольцо, обращенное вогнутой поверхностью вниз, на которой установлены пластины. На модернизированную валково-тарельчатую мельницу с устройством возврата материала на домол получен патент РФ.

В четвертой главе описана методика оптимизации конструктивных и технологических параметров мельницы, работающей в замкнутом цикле. Необходимо отметить, что существующие модели базируются на кинетике помола в барабанной мельнице периодического действия и в них не учитываются размеры исходного и конечного продуктов. Однако в валковых мельницах практически невозможно получить уравнения кинетики помола вследствие сложности определения соотношения количества материала, попадающего в классификатор и выходящего из него. Эти сложности связаны с тем, что процесс сепарации происходит во встроенном в помольный агрегат классификаторе. Поэтому нами была предпринята попытка математического описания и оптимизации процесса измельчения материала в мельницах, работающих в замкнутом цикле, применительно к валково-тарельчатым. Перво начальной задачей являлось определение оптимальной эффективности классификации для обеспечения максимальной



$$i = \frac{(1-E)d_0 + EC_3d_2}{(1-C_3)(1-E)d_1 + (1+E)C_3d_2} \quad (10)$$

Поставленная задача оптимизации решалась методами нелинейного программирования. В качестве целевой функции была выбрана степень измельчения, а ограничения задавались по оптимальной эффективности и по среднему размеру циркулирующей фракции, причем диапазоны изменения этих параметров принимались:  $0 < E_{\text{опт}} < 1$ ,  $d_1 < d_2 < d_0$ . В качестве начальных условий выступали размер зерен исходного материала  $-d_0$  и готового продукта  $-d_1$ . Кроме того, задавалась доля крупной фракции  $C_3$  в готовом продукте. Этот параметр, как остаток на сите, является одним из основных при определении качества помола. Расчеты проводились на ЭВМ, при этом размер исходного материала изменялся от 5 до 15 мм, готового продукта в диапазоне 50 – 300 мкм, а  $C_3$  принималась 10%. В результате расчетов определена оптимальная эффективность классификации для достижения любой конкретной степени измельчения при изменении остальных параметров в широком диапазоне.

Однако степень измельчения – это качественный показатель и его недостаточно для проведения полного анализа работы мельницы. Необходим учет количественных показателей, главным из которых является производительность.

Производительность валково-тарельчатой мельницы прямо пропорциональна ее геометрическим и технологическим параметрам и обратно пропорциональна кратности циркуляции:

$$Q = \frac{1}{k_{\text{ц}}} \cdot v_{\text{в}} \cdot L_{\text{б}} \cdot h \cdot \rho \cdot z, \quad (11)$$

где  $k_{\text{ц}}$  – кратность циркуляции;  $v_{\text{в}}$  – окружная скорость вала, м/с;  $L_{\text{б}}$  – ширина вала, м.;  $h$  – толщина слоя материала под валком, м;  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $z$  – число валков.

Если технологические и геометрические параметры можно рассчитать по известным методикам, то кратность циркуляции обычно принимается из конструктивных соображений в диапазоне  $k_{\text{ц}}=10-15$ . До сих пор ни кем не предложен метод расчета и оптимизации этого параметра, что вполне объяснимо сложностью протекающих в мельнице процессов. Поэтому нами была предпринята попытка решить эту задачу.

Кратность циркуляции определяется общим количеством циклов воздействия на материал до его полного разрушения. Это количество циклов  $n$  определяется по формуле:

$$n = \frac{3 \cdot \lg(i)}{\lg(a)}, \quad (12)$$

где  $i$  – степень измельчения;  $a$  – объемная степень измельчения при однократном воздействии.

В свою очередь, для валковой мельницы общее количество циклов прямо пропорционально количеству циклов воздействия вала на материал за один проход его по тарелке  $n_B$  и кратности циркуляции:  $n = k_{\text{ц}} \cdot n_B$ .

После преобразований получили следующую формулу для производительности:

$$Q = \frac{n_B \cdot \lg(a)}{3 \cdot \lg(i)} \cdot v_a \cdot L_b \cdot h \cdot \rho \cdot z. \quad (13)$$

С точки зрения оптимизации по разработанной схеме (рисунок 9) все параметры, кроме кратности циркуляции, можно принять постоянными величинами. После обозначения их параметром  $\Omega$ , окончательно формула для производительности примет вид:

$$Q = \frac{n_B \cdot \lg(a)}{3 \cdot \lg(i)} \cdot \Omega. \quad (14)$$

Мы получили искомую функцию  $Q$  в явном виде в зависимости от трех переменных. Эта задача оптимизации была решена также методами нелинейного программирования. В качестве целевой функции принимали производительность  $Q$ , а ограничивающими параметрами – количество циклов воздействия вала  $n_B$ , объемную степень измельчения  $a$  и традиционную степень измельчения  $i$ . Величину последнего параметра приняли как  $i_{\text{max}}$ , полученную из предыдущей задачи.

Апробация предложенного метода была проведена при оптимизации параметров полупромышленной валковой мельницы для помола гипсового камня. При решении поставленной задачи с помощью ЭВМ была найдена максимальная производительность помольного агрегата при оптимальном значении кратности циркуляции  $k_{\text{ц}} = 6$ . При этом степень измельчения достигала  $I = 70$ .

Таким образом, разработанная схема помола в замкнутом цикле наиболее объективно отражает влияние всех факторов на этот процесс. Методика оптимизации и ее апробация показали, что с достаточно высокой точностью можно определить оптимальную эффективность классификации для обеспечения максимальной степени измельчения и найти максимальную производительность помольного агрегата при оптимальном значении кратности циркуляции.

В пятой главе представлены результаты практической реализации. На основании проведенных экспериментальных и теоретических исследований разработаны рекомендации по расчету и проектированию валково-тарельчатых мельниц с воздушной классификацией продуктов измельчения.

С использованием этих рекомендаций создана опытно-промышленная конструкция агрегата для измельчения материалов средней прочности, сочетающая в себе основные преимущества, выявленные в ходе проделанной работы. В мельнице установлено предложенное на уровне изобретения новое сепарационное устройство с коническим отбойником. Мельница была установлена на ОАО «Белгипс» на стадии изготовления сухой строительной смеси дляшту-

катурных и отделочных работ и использовалась для помола строительного гипса марки Г-4. В результате испытаний установлено, что при обработке гипса в валковой мельнице значительно повышается его удельная поверхность и тонина помола. Остаток на сите 200 мкм снизился с 5% до нуля и составил около 25% на сите 90 мкм. Удельная поверхность повысилась приблизительно на 30% с  $2800 \text{ см}^2/\text{г}$  до  $3600 \text{ см}^2/\text{г}$ . Использование обработанного в валковой мельнице гипса привело к повышению физико-механических свойств сухой строительной смеси. При помоле в валковой мельнице получен продукт более однородный по составу, с пониженной водопотребностью, а следовательно, повышенной прочностью. Таким образом, можно сделать вывод о явной перспективности использования валково-тарельчатых мельниц для помола гипса и измельчения другого минерального сырья в промышленности строительных материалов. Кроме того, по заданию могилевского предприятия ООО «Форвард» разработан технический проект на валково-тарельчатую мельницу производительностью 2 т/ч с роторным сепаратором. По разработанной технической документации на вышеуказанном предприятии ведется изготовление и планируется внедрение помольного агрегата на Бобруйском ОАО «Силикат» для тонкого измельчения гипсового камня и других материалов средней прочности.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе решения уравнений движения материала относительно размольной тарелки и из условия его гарантированного попадания под валки определен диапазон оптимальных частот вращения тарелки [1, 10]. Впервые проведена оценка влияния сил трения между частицами на параметры движения. Установлено, что это влияние существенно при высоких частотах вращения, а для рабочего диапазона частот валково-тарельчатых мельниц его можно не учитывать [8].

2. Изучено распределение скорости газа в сепарационной зоне мельницы, дающее возможность выбрать рациональный тип ввода газа и спрогнозировать характер движения твердых частиц в сепарационной зоне [3].

3. Составлены уравнения движения твердых частиц с учетом истинного распределения скорости газа и на основе их решения определены координаты и скорости частиц после схода с размольной тарелки, что позволило в совокупности с предложенным техническим решением повысить эффективность сепарации и снизить возможность провала материала под тарелку [2, 4, 6, 14, 16].

4. Экспериментально подтверждена высокая эффективность и низкие энергозатраты при проведении помола в валково-тарельчатых мельницах, определены направления и области рационального использования различных конструкций сепараторов в комплексе с этой мельницей [7, 9].

5. Предложена схема и модель замкнутого цикла помола материала в мельнице, охватывающая основные технологические параметры, при реализации которой удалось рассчитать оптимальные значения этих парамет-

ров для достижения максимальной производительности при минимальных энергозатратах [5, 11].

6. Экспериментальные и теоретические исследования [13, 15] использованы при расчете и проектировании полупромышленной установки [16], которая прошла испытания на стадии изготовления сухой строительной смеси для помола гипса на ОАО «Белгипс» и показала свою высокую эффективность. По результатам работы разработан технический проект на валково-тарельчатую мельницу производительностью 2 т/ч, внедрение которой планируется на Бобруйском ОАО «Силикат».

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

### *Статьи*

1. Францкевич, В.С. Оптимизация движения материала по размольной тарелке среднеходной мельницы / В.С. Францкевич, П.Е. Вайтехович // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорганич. в-в/ Бел. гос. техн. у-т. – Минск – 2001. – Вып. IX. – С. 109–113.
2. Францкевич, В.С. Движение одиночной частицы измельчаемого материала в кольцевом зазоре среднеходной мельницы / В.С. Францкевич, А.А. Гарабажиу // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорганич. в-в/ Бел. гос. техн. у-т. – Минск – 2002. – Вып. X. – С. 229–233.
3. Францкевич, В.С. Распределение скоростей газа в сепарационной зоне валковой мельницы / В.С. Францкевич // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорганич. в-в/ Бел. гос. техн. у-т. – Минск – 2003. – Вып. XI. – С. 211–216.
4. 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.
5. Вайтехович, П.Е. Оптимизация технологических параметров энергоэффективной валковой мельницы / П.Е. Вайтехович, В.С. Францкевич // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергет. объединений СНГ. – 2004. – № 6. – С. 59–64.
6. Францкевич, В.С. Моделирование движения частицы материала в кольцевом зазоре валковой среднеходной мельницы / В.С. Францкевич // Весці НАН Беларусі. Серыя фіз.-тэхн. навук. – 2004. – № 4. – С. 39–43.
7. Вайтехович, П.Е. Исследования влияния рабочих параметров валковых мельниц на удельные энергозатраты / П.Е. Вайтехович, В.С. Францкевич // Строительная наука и техника. 2007. – № 2. – С. 18–22.
8. 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 неорганич. в-в/ Бел. гос. техн. у-т. – Минск – 2007. – Вып. XV. – С. 149–152.

### *Материалы конференций*

9. Францкевич, В.С. Разработка и исследование среднеходной мельницы / В.С. Францкевич // Тезисы 51-й студенческой науч.-техн. конф., Минск, 23-25 апр. 2000 г. / Бел. гос. технол. у-т. – Минск: БГТУ, 2000. – С. 17.
10. Францкевич, В.С. Математическое моделирование движения частицы материала в валковой среднеходной мельнице / В.С. Францкевич, П.Е. Вайтехович // Интерстроймех-2002: материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 2002 г. / Могилев. гос. технолог. у-т. – Могилев: МГТУ, 2002. – С. 388–389.
11. Францкевич, В.С. Оптимизация конструктивных и технологических параметров валковой среднеходной мельницы / В.С. Францкевич // Новые технологии в химической промышленности: материалы докл. в Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2002 г.: в 2 ч – Минск: БГТУ, 2002. – Ч. 1. – 344 с.
12. Францкевич, В.С. Диссипация энергии в механически активированном угле / В.С. Францкевич, В.Ю. Мурог // Технологические комплексы, оборудование предприятий строительных материалов и стройиндустрии: сб. докл. Междунар. Интернет-конференции. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2003. – С. 115–116.
13. Францкевич, В.С. Валковые среднеходные мельницы в цементной промышленности / В.С. Францкевич, В.Ю. Мурог // Технологические комплексы, оборудование предприятий строительных материалов и стройиндустрии: сб. докл. Междунар. Интернет-конференции. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2003. – С. 190–191.
14. Францкевич, В.С. Изучение движения газовых потоков в сепарационной зоне валковой мельницы / В.С. Францкевич, П.Е. Вайтехович // Новейшие достижения в области импортозамещения в химической промышленности и производстве строительных материалов: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Минск: БГТУ, 2003. – С. 125–127.
15. Францкевич, В.С. Перспективы использования энергосберегающих среднеходных мельниц в промышленности стройматериалов / В.С. Францкевич // Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии. материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 16-18 нояб. 2005 г.: в 2 ч. – Минск: БГТУ, 2005. – Ч. 1. – С. 105–107.

### *Патент на изобретение*

16. Валковая мельница: пат. 8245 Респ. Беларусь, МКИ В 02С / В.С. Францкевич, П.Е. Вайтехович, В.С. Володько; заявитель БГТУ – № а20030475; заявл. 30.05.03; опубл. 17.03.06 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2004. – № 43. – С. 26.



Францкевіч Віталій Станіслававіч

**Аптымiзацыя працэсу памолу крохкіх матэрыялаў  
сярэдняй трываласці ў валкова-талерчатых млынах  
з паветранай класіфікацыяй**

**ЗДРАБНЕННЕ, МЛЫН ВАЛКОВЫ, ЭКСПЕРЫМЕНТ, ПРОФІЛ  
ХУТКАСЦЕЙ, МАДЭЛЯВАННЕ, ТРАЕКТОРЫЯ РУХУ, ЗОНА  
СЕПАРАЦЫІ, АПТЫМІЗАЦЫЯ, ЗАМКНЁНЫ ЦЫКЛ,  
ПРАМЫСЛОВЫЯ ВЫПРАБАВАННІ**

Аб'ектам даследаванняў служылі працэсы дыспергавання і сепарацыі, якія адбываюцца ў высокаэфектыўных валкова-талерчатых млынах.

Мэтай дысертацыйнай работы з'яўлялася павышэнне эфектыўнасці апрацоўкі матэрыялаў у валковых млынах на аснове аптымiзацыі працэсу памолу ў ім.

У дадзенай рабоце на падставе крытычнага аналізу навукова-тэхнічнай інфармацыі разгледжана сутнасць працэсу здрабнення ў цэлым і ўказаны спецыфіка і асаблівасці гэтага працэсу для валковых млыноў. Вывучана размеркаванне хуткасці газу ў сепарацыйнай зоне млына, якое дае магчымасць выбраць рацыянальны тып уводу газу і спрагназаваць характар руху цвёрдых часцінак. На падставе праведзеных эксперыментальных даследаванняў валковага млына пацверджаны іх высокая эфектыўнасць і нізкія адносныя энергавыдаткі, выбрана вобласць рацыянальнага выкарыстання гэтых агрэгатаў для здрабнення розных матэрыялаў. Складзены раўнанні руху цвёрдых часцінак у зонах памолу і сепарацыі і на аснове іх рашэння вызначаны хуткасці і траекторыя руху гэтых часцінак у памольным агрэгате. На аснове атрыманых сістэм мадэлей руху матэрыялу разлічваюцца аптымальныя канструкцыйныя і тэхналагічныя параметры валковых млыноў. Таксама прапанавана новая канструкцыя ўстройства звароту буйнога прадукту на дамол, якая дазваляе павысіць эфектыўнасць сепарацыі і знізіць магчымасць правалу матэрыялу пад талерку. Распрацаваны схема і мадэль замкнёнага цыкла памолу матэрыялу ў млыне, што ахоплівае асноўныя тэхналагічныя параметры, рэалізацыя якой дала магчымасць разлічыць аптымальныя значэнні гэтых параметраў для дасягнення максімальнай прадукцыйнасці.

На аснове эксперыментальных і тэарэтычных даследаванняў спраектавана паўпрамысловая ўстаноўка, якая прайшла выпрабаванні на стадыі выбару сухой будаўнічай сумесі для памолу гіпсу на ААТ «Белгіпс» і паказала сваю высокую эфектыўнасць.

Францкевич Виталий Станиславович

**Оптимизация процесса помола хрупких материалов  
средней прочности в валково-тарельчатых мельницах  
с воздушной классификацией**

**ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ, МЕЛЬНИЦА ВАЛКОВАЯ, ЭКСПЕРИМЕНТ,  
ПРОФИЛИ СКОРОСТЕЙ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, ТРАЕКТОРИЯ  
ДВИЖЕНИЯ, ЗОНА СЕПАРАЦИИ, ОПТИМИЗАЦИЯ,  
ЗАМКНУТЫЙ ЦИКЛ, ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ**

Объектом исследований служили процессы диспергирования и сепарации, протекающие в высокоэффективных валково-тарельчатых мельницах.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности обработки материалов в валковых мельницах на основе оптимизации процесса помола в ней.

В настоящей работе на основании критического анализа научно-технической информации рассмотрена сущность процесса измельчения в целом и указана специфика и особенности этого процесса для валковых мельниц. Изучено распределение скорости газа в сепарационной зоне мельницы, дающее возможность выбрать рациональный тип ввода газа и спрогнозировать характер движения твердых частиц. На основании проведенных экспериментальных исследований валковой мельницы подтверждены их высокая эффективность и низкие удельные энергозатраты, выбрана область рационального использования этих агрегатов для измельчения различных материалов. Составлены уравнения движения твердых частиц в зонах помола и сепарации и на основе их решения определены скорости и траектория движения данных частиц в помольном агрегате. На основе полученных систем моделей движения материала рассчитываются оптимальные конструкционные и технологические параметры валковых мельниц. Также предложена новая конструкция устройства возврата крупного продукта на домол, позволяющая повысить эффективность сепарации и снизить возможность провала материала под тарелку. Разработаны схема и модель замкнутого цикла помола материала в мельнице, охватывающая основные технологические параметры, при реализации которой удалось рассчитать оптимальные значения этих параметров для достижения максимальной производительности.

На основе экспериментальных и теоретических исследований спроектирована полупромышленная установка, которая прошла испытания на стадии изготовления сухой строительной смеси для помола гипса на ОАО «Белгипс» и показала свою высокую эффективность.

## SUMMARY

Frantskevich Vitali Stanislavovich

**Optimization of process of a grinding of brittle materials  
of medial strength in roll mills with air classification**

GRINDING, ROLL MILL, EXPERIMENT,  
STRUCTURES OF SPEEDS, MODELLING, TRAJECTORY OF  
MOVEMENT, ZONE OF SEPARATION, OPTIMIZATION,  
THE CLOSED CYCLE, INDUSTRIAL TESTS

As installation of researches processes of a dispergation and the separations proceeding in highly effective rollers mills.

The purpose of dissertational work is raise of efficiency of machining of a materials in rollers on the basis of optimization of process of a flour milling in it.

In the present work on the basis of the critical analysis of the scientific and technical information, the essence of process of powdering as a whole surveyed and specificity and habits of this process for rollers is specified. Distribution of speed of gas in separations to a zone of the mill is investigated, giving an opportunity to choose rational type of feeding into of gas and to predict character of traffic of firm corpuscles. On the basis of the lead experimental researches of the roller, their tall efficiency and low specific power inputs is confirmed, the area of intelligent use of these assemblies for powdering various materials picked. The equations of traffic of firm corpuscles in zones of a flour milling and separation are made and on the basis of their solution speeds and a path of their traffic in grinding the assembly is determined. On the basis of the received systems of models of traffic of material optimum constructional and technological parameters of rollers pay off. Also the new design of the device of retrace of a large product on re-grinding is offered, allowing to raise efficiency of separation and to lower an opportunity of a under-shooting of a material under a plate. The circuit design and model of the closed cycle of a flour milling of a material in the mill, covering a basic technological parameters at which implementation it was possible to calculate optimum values of these parameters for achievement of the maximum productivity is developed.

On the basis of experimental and theoretical researches installation which has passed tests for stages of manufacturing of a dry building mix for grinding gypsum on Open Society "Belgyps" is designed industrial and has shown the tall efficiency.

**Францкевич Виталий Станиславович**

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПОМОЛА ХРУПКИХ  
МАТЕРИАЛОВ СРЕДНЕЙ ПРОЧНОСТИ  
В ВАЛКОВО-ТАРЕЛЬЧАТЫХ МЕЛЬНИЦАХ С ВОЗДУШНОЙ  
КЛАССИФИКАЦИЕЙ**

Подписано в печать 08.11.2007. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,3. Уч.-изд. л. 1,3.

Тираж 80 экз. Заказ 535.

Учреждение образования  
«Белорусский государственный технологический университет».  
220006, Минск, Свердлова, 13а.  
ЛИ № 02330/0133255 от 30.04.2004.

Отпечатано в лаборатории полиграфии учреждения образования  
«Белорусский государственный технологический университет».  
220006, Минск, Свердлова, 13.  
ЛПТ № 02330/0056739 от 22.01.2004.