На правах рукописи

ХАНИН СЕРГЕЙ ИВАНОВИЧ

РАЗРАБОТКА НАУЧНЫХ ОСНОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

ШАРОВЫХ МЕЛЬНИЦ С ЭНЕРГООБМЕННЫМИ И

КЛАССИФИЦИРУЮЩИМИ УСТРОЙСТВАМИ

05.02.13 Машины, агрегаты и процессы (строительство и ЖКХ)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени доктора технических наук

Белгород – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образова¬тельном учреждении высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова)

Научный консультант:

Официальные оппоненты:

Ведущая организация:

Богданов Василий Степанович

доктор технических наук, профессор, заслуженный работник высшей школы, заслуженный изобрета¬тель РФ

Сиваченко Леонид Александрович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры транспортных и технологических машин ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет».

Исаков Владимир Семёнович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой подъёмно-транспортных, строительных и дорожных машин ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова».

Вайтехович Пётр Евгеньевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машин и аппаратов химических и сили¬катных производств УО «Белорусский государ-ственный технологический университет».

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследова-тельский технический университет».

Защита диссертации состоится « 5 » «апреля» 2017 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 999.098.04 на базе ФГБОУ ВО «Ор-ловский государственный университет им. И.С. Тургенева», ФГБОУ ВО «Бел-городский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», по адресу: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, ауд. ГК 242.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке

ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет

им. В.Г. Шухова» и на сайте: (URL: http://dekanat.bsu.edu.ru/

blocks/bsu\_disser/main17.php?q=consideredcases&tab=c&nomzap=888).

Автореферат размещен на сайте ВАК при Министерстве образования и науки РФ (URL: http://vak.ed.gov.ru).

Автореферат разослан \_\_\_ « января » 2017 г. Учёный секретарь диссертационного совета

В.В. Ломакин

3

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Помол различных материалов являет¬ся неотъемлемой частью многих производств как в промышленности строи¬тельных материалов, так и других отраслях. Увеличение дисперсности сред приводит к интенсификации протекающих в них химических процессов. От тонкости помола продуктов переработки, гранулометрического распределения во многом зависят качественные характеристики выпускаемой продукции – од¬нородность распределения свойств, прочностные характеристики и другие. Раз¬личие свойств материалов, условий помола и требований к характеристикам продуктов измельчения предопределило образование класса измельчителей, отличающихся как способом разрушающего воздействия на материал, так и конструктивно.

Ежегодные потребности промышленного производства Российской Феде-рации в тонкомолотых материалах составляют сотни миллионов тонн. В це-ментном производстве процессу помола подвергаются более ста двадцати мил¬лионов тонн различных материалов. В технологии производства цемента этот процесс является одним из энергоёмких. Так, при помоле сырьевых материалов, клинкера и добавок расходуется около 60% электроэнергии, необходимой для производства цемента, и в зависимости от способа производства суммарные удельные энергозатраты составляют около 65…70 кВт∙ч/т.

На предприятиях промышленности строительных материалов преимуще-ственное распространение получили шаровые мельницы (ШМ), успешно при-меняемые на протяжении более ста лет для помола различных материалов. Их широкому распространению способствовали универсальность применения; от¬носительная простота конструкции и эксплуатации; достаточно высокая произ¬водительность; возможность измельчения материалов с относительно большой исходной крупностью кусков, различной гаммой свойств, в том числе и с пони¬женной размалываемостью как в условиях сухого, так и мокрого помолов. К основному недостатку, способствующему вытеснению ШМ другими типами помольных агрегатов, следует отнести повышенные удельные энергозатраты, к которым приводит несовершенство процессов движения мелющих тел (МТ) и выделения из шароматериальной среды кондиционных частиц материала.

На ряде предприятий нашли применение внутримельничные классифици-рующие устройства и интенсифицирующие процесс движения МТ энергооб-менные устройства. Однако широкого распространения на эксплуатируемых в промышленности строительных материалов ШМ они не получили ввиду кон¬структивных и эксплуатационных особенностей.

В этой связи разработка рациональных конструкций ШМ, обладающих по¬вышенной эффективностью процесса измельчения материала, и научных основ их проектирования, базирующихся на описаниях основных протекающих в мельницах процессов, является актуальной проблемой.

Степень разработанности темы диссертационного исследования.

Значительный вклад в область исследований процессов движения мелю-

4

щих тел внесли отечественные и зарубежные учёные: С.Е. Андреев, В.С. Богда¬нов, Ю.А. Веригин, Н.Д. Воробьёв, Э. Дэвис, Д.К. Крюков, А.Н. Марюта, Т. Пошел, Р. Реичардт, В.С. Севостьянов, Н.Н Юдахин. Исследованиям процес¬сов измельчения, классификации материалов посвящены работы: Ф.С. Бонда, М.А. Вердияна, А.А. Гриффитса, В.П. Жукова, А.И. Загустина, В.В. Кафарова, В.А. Кирпичева, Ф. Кика, П.А. Ребиндера, П.Р. Риттингера, Г. Румпфа, Г.С. Хо-дакова, Р.Р. Шарапова и многих других.

Для описания процессов движения мелющих тел применяются модели: двухфазного движения шара, сплошной или сыпучей среды, могофазного плос¬кого движения мелющих тел. При исследовании процессов измельчения мате¬риала широко используются стохастический, селективный, энергетический ме¬тоды, применения двухкомпонентных моделей. Для описания процессов клас¬сификации получили распространение стохастические модели.

Представляет интерес разработка методов, позволяющих описать во взаи¬мосвязи процессы движения мелющих тел, их взаимодействия с внутримель-ничными устройствами; процессы разрушения частиц материала при их взаи¬модействии друг с другом, мелющим телом, внутримельничным устройством; перемещения частиц из шароматериальной загрузки через отверстия классифи¬цирующих устройств; исследовать процессы с целью определения рациональ¬ных конструктивно-технологических параметров шаровых мельниц с устрой¬ствами, обеспечивающими эти процессы.

Объект исследования. Шаровые мельницы.

Предмет исследования. Процессы движения и классификации мелющих тел, измельчения материала в шаровых мельницах с энергообменными и клас-сифицирующими устройствами.

Цель работы заключается в разработке научных основ проектирования шаровых мельниц с энергообменными и классифицирующими устройствами, обеспечивающих повышение производительности, снижение удельного расхода электроэнергии.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработка научных и методологических основ проектирования шаро¬

вых мельниц с энергообменными и классифицирующими устройствами.

2. Разработка метода расчета параметров процессов пространственного

движения мелющих тел и частиц материала, их взаимодействия с различными

конструкциями бронефутеровок, внутримельничных энергообменных и класси¬

фицирующих устройств, друг с другом; измельчения частиц материала, их клас¬

сификации; расчёта «затрачиваемой» мощности, динамических нагрузок на кон¬

струкцию мельницы.

3. Разработка математических моделей процессов пространственного дви¬

жения сферического тела в камерах мельницы, его взаимодействия с различны¬

ми внутримельничными устройствами; разрушения сферической частицы мате¬

риала и перемещения из шароматериальной загрузки через отверстия классифи¬

цирующих устройств.

5

4. Получение аналитических выражений для расчета изменения кинетиче¬ской энергии корпуса мельницы в результате взаимодействия сферического тела с бронефутеровкой, внутримельничными устройствами, передаваемых корпу¬сом мельницы на подшипники динамических нагрузок; методики расчёта дина¬мических нагрузок на конструкции корпуса и устройств.

5. Разработка метода расчёта конструктивно-технологических параметров шаровых мельниц.

6. Исследование закономерностей процессов движения мелющих тел,

классификации, их взаимодействия с бронефутеровкой, внутримельничными

устройствами; измельчения материала в шаровых мельницах. Установление

рациональных конструктивно-технологических параметров мельниц с энерго¬

обменными и классифицирующими устройствами.

7. Обоснование целесообразности применения энергообменных и класси¬

фицирующих устройств с учётом типоразмера мельниц, свойств измельчаемых

материалов, способа и стадийности их измельчения. Разработка патентно-

защищённых конструкций шаровых мельниц с энергообменными и классифи¬

цирующими устройствами, обеспечивающих повышение производительности и

снижение удельного расхода электроэнергии.

8. Применение результатов работы на промышленных мельницах.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработаны научные и методологические основы проектирования ша¬

ровых мельниц с энергообменными и классифицирующими устройствами.

2. Разработан метод расчета параметров процессов пространственного

движения мелющих тел и частиц материала, их взаимодействия с различными

конструкциями бронефутеровок, внутримельничных устройств, друг с другом;

измельчения частиц материала, их классификации; расчёта «затрачиваемой»

мощности, динамических нагрузок на конструкцию мельницы.

3. Разработан метод расчёта конструктивно-технологических параметров

шаровых мельниц.

4. Разработаны математические модели процессов пространственного дви¬жения сферического тела в камерах конусообразной и цилиндрической формы мельницы, его взаимодействия с различными конструкциями бронефутеровок, перегородок, энергообменных и классифицирующих устройств; разрушения частиц материала при их взаимодействии друг с другом, мелющим телом, внут-римельничным устройством; перемещения частицы из шароматериальной за¬грузки через отверстия классифицирующих устройств.

5. Получены аналитические выражения, позволяющие рассчитать измене¬ния кинетической энергии корпуса мельницы в результате взаимодействия сфе¬рического тела с бронефутеровкой, внутримельничными устройствами, переда¬ваемые корпусом на подшипники динамические нагрузки; методика расчёта динамических нагрузок на конструкции корпуса и устройств.

6. На основе разработанных методов исследованы и установлены законо¬мерности изменения в мельнице с энергообменными и классифицирующими

6

устройствами: параметров процессов движения МТ, классификации, их взаимо¬действия друг с другом, бронефутеровкой, внутримельничными устройствами; измельчения различных материалов; динамических нагрузок на подшипники; кинетической энергии корпуса, устройств; мощности, затрачиваемой на преодо¬ление сил сопротивления при взаимодействии мелющих тел с внутримельнич-ными устройствами и бронефутерованным корпусом.

7. Установлены рациональные конструктивно-технологические параметры шаровых мельниц с лопастными энергообменными и классифицирующими устройствами, обеспечивающими повышение производительности и снижение удельного расхода электроэнергии при помоле материалов.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что разработаны научные и методологические основы моделирования и расчета параметров основных процессов, протекающих в корпусе мельницы с энерго¬обменными и классифицирующими устройствами, расчёта её конструктивных и технологических параметров, позволяющие осуществлять постановку и реше¬ние новых задач по проектированию и модернизации шаровых мельниц. Разра¬ботаны рекомендации использования в мельнице патентно-защищенных кон¬струкций лопастных энергообменных и классифицирующих устройств, обеспе¬чивающих повышение ее производительности на 12…24 %, снижение удельного расхода электроэнергии на 9…22 %.

Результаты выполненной работы реализованы при проектировании шаро¬вых мельниц с различными конструкциями энергообменных, классифицирую¬щих устройств и их внедрении в промышленности строительных материалов; используются в учебном процессе БГТУ им. В.Г. Шухова.

Методология и методы исследования основывались на методах эм-пирического исследования, теоретического познания, общелогических методах. В процессе исследований применялись методы математического, физического и компьютерного моделирования; математической статистики; теории подобия и размерностей; конечных элементов; измерения электрических величин. Автор защищает следующие основные положения.

Научные и методологические основы проектирования ШМ с энергообмен¬ными и классифицирующими устройствами, включающие в себя:

– математические модели процессов пространственного движения сфери-ческого тела в камерах конусообразной и цилиндрической формы шаровой мельницы, его взаимодействия с различными конструкциями бронефутеровок, перегородок, энергообменных и классифицирующих устройств; разрушения частиц материала при их взаимодействии друг с другом, мелющим телом, внут-римельничным устройством; перемещения частицы из шароматериальной за¬грузки через отверстия классифицирующих устройств;

– аналитические выражения, позволяющие рассчитать изменения кинети-ческой энергии корпуса мельницы в результате взаимодействия сферического тела с бронефутеровкой, внутримельничными устройствами, передаваемые корпусом мельницы на подшипники динамические нагрузки; методику расчёта

7

динамических нагрузок на конструкции корпуса и устройств;

– метод расчета параметров процессов пространственного движения ме-лющих тел и частиц материала, их взаимодействия с различными конструкция¬ми бронефутеровок, внутримельничных устройств, друг с другом; измельчения частиц материала, их классификации; расчёта «затрачиваемой» мощности, ди¬намических нагрузок на конструкцию мельницы;

– метод расчёта конструктивно-технологических параметров мельниц.

Научно обоснованные положения о закономерностях процессов движения мелющих тел, их взаимодействия с друг с другом, бронефутеровкой, внутри-мельничными устройствами; измельчения материала в камерах конусообразной формы и цилиндрической формы с лопастными энергообменными, классифи¬цирующими устройствами.

Патентно-защищённые конструкции ШМ с лопастными энергообменными и классифицирующими устройствами, обеспечивающими повышение их произ¬водительности и снижение удельного расхода электроэнергии.

Достоверность научных положений и выводов основывается на использо¬вании современных методов и методик расчёта, применении контрольно-измерительного оборудования высокой точности и подтверждается совпадени¬ем результатов теоретических и экспериментальных исследований, а также по¬ложительными результатами реализации научно-технических разработок в про¬мышленных условиях.

Апробация результатов работы. Основные положения работы доклады-вались, обсуждались и получили одобрение на заседаниях технических советов Карачаево-Черкесского цементного завода, ОАО «Завод силикатных стеновых материалов»; ЗАО «Катавский цемент»; Международном конгрессе БГТУ (Бел¬город, 2003), Международном форуме Академии наук о Земле (2004, Москва), Международном конгрессе БГТУ им. В. 9Г. Шухова (2005, Белгород), Межре¬гиональной научной конференции с международным участием БрГУ (Братск, 2006), Международной научной конференции БГТУ им. В. Г. Шухова (2007, Белгород), Международной научной конференции БГТУ им. В. Г. Шухова (2010, Белгород), Международной научной конференции СГТУ (2010, Саратов), Международной научной конференции «ИНТЕРСТРОЙМЕХ 2010» (2010, Бел¬город), Всероссийской научной конференции БрГУ (Братск, 2011), Междуна¬родной научно-практической конференции БГТУ им. В. Г. Шухова (2016, Бел¬город).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 60 работ, в том числе: 16 работ опубликовано в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК; 2 работы – в изданиях, индексируемых в международной базе Skopus; монография; получено 13 изобретений и патентов, 2 свидетельства о государ¬ственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, девяти глав, заключения по работе, списка литературы (291 наименование), приложе¬ний. Общий объем диссертации 402 страницы, в том числе 372 страницы основ-

8

ного текста, 108 рисунков, 33 таблицы. Приложения на 81 странице включают сведения о промышленном применении результатов исследований в виде актов внедрения, промышленных испытаний, технического состояния мельниц и рас¬чётов экономической эффективности.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ Во введении изложены актуальность темы исследования, степень ее раз¬работанности, цель, задачи, научная новизна, теоретическая и практическая зна¬чимость, методология и методы исследования, выносимые на защиту основные положения, степень достоверности и апробация результатов.

Глава 1. Анализ исследований в области совершенствования работы шаро¬вых мельниц

В главе приведён анализ состояния и развития техники и технологии для помола материалов. Благодаря преимущественным особенностям ШМ нашли широкое распространение для помола различных материалов. В то же время, недостаточная эффективность процесса измельчения материалов, проявляюща¬яся в повышенном удельном расходе электроэнергии, ограничивает их конку¬рентное преимущество перед другими помольными агрегатами.

Анализ конструкций внутримельничных устройств и их влияния на проте¬кающие в ШМ процессы движения МТ, классификации материала и МТ свиде¬тельствует о целесообразности разработки новых конструкций, обеспечиваю¬щих рациональное совмещение рассматриваемых процессов. Анализ результа¬тов теоретических и экспериментальных исследований процессов движения МТ, их взаимодействия друг с другом, устройствами; процессов измельчения и классификации материала свидетельствует о необходимости разработки методов и математических моделей, позволяющих описать рассматриваемые процессы во взаимосвязи и определить рациональные конструктивно-технологические параметры ШМ с устройствами, обеспечивающими эти процессы. Ввиду разно¬образия конструкций внутримельничных устройств и необходимости большого объёма вычислений для получения характеризующих рассматриваемые процес¬сы параметров, методы и модели должны обладать универсальностью примене¬ния и возможностью их совместной компьютерной реализации.

Анализ исследований в области совершенствования работы шаровых мельниц дает основание положить в основу исследований рабочую гипотезу: эффективность процесса измельчения материала в мельнице может быть повы¬шена за счёт изменения устройствами скоростных характеристик процесса дви¬жения мелющих тел при вращении корпуса и удаления из зоны измельчения мелкой фракции материала по мере её образования.

Глава 2. Математическое моделирование процесса пространственного движения сферического тела в мельнице с устройствами

Для повышения эффективности процесса измельчения материалов с учё-

9

том их характеристик, условий измельчения и типоразмеров ШМ разработаны патентно-защищённые конструкции лопастных энергообменных устройств (ЛЭУ), обеспечивающие упорядоченное изменение скоростных характеристик процесса движения МТ при вращении корпуса. Предложена классификация объединённых по технологическому назначению ЛЭУ.

В качестве основных, протекающих в ШМ процессов, рассмотрены движе¬ния МТ, частиц материала; их взаимодействия друг с другом, бронефутеровкой, внутримельничными устройствами; измельчение и классификация частиц мате¬риала. Разработаны алгоритмы и структуры данных для описания совмещённых рассматриваемых процессов на основе их объектно-ориентированного пред¬ставления. Разработан метод расчета параметров процессов пространственного движения мелющих тел и частиц материала, их взаимодействия с различными конструкциями бронефутеровок, внутримельничных устройств, друг с другом; измельчения частиц материала, их классификации; расчёта «затрачиваемой» (на преодоление сил сопротивления при взаимодействии МТ с бронефутеровкой, устройствами) мощности; динамических нагрузок на конструкцию ШМ. При этом методы объектно-ориентированной среды соответствуют математическим моделям, описывающим параметры процессов. Алгоритм расчёта параметров протекающих в корпусе ШМ основных процессов, «затрачиваемой» мощности, динамических нагрузок на её конструкцию, являющийся важной частью разра¬ботанного метода, приведен на рисунке 1. Барабан ШМ представлен состоящим из набора обечаек с произвольным углом конусности. В нём задается располо¬жение различных устройств. МТ и материал рассматриваются в виде сфериче¬ских тел различных размеров и обладающих различными характеристиками. В начальный момент им всем определяются кинематические параметры (угловые скорости; координаты, линейные скорости центров масс). С использованием математической модели процесса пространственного движения сферического тела рассчитывается время их движения до находящихся в камере объектов, выбирается минимальное, определяющее ближайшее взаимодействие. С ис¬пользованием математической модели процесса взаимодействия сферического тела с другим сферическим телом, бронефутеровкой, внутримельничным устройством рассчитывается ударное взаимодействие установленных объектов, определяются ударный импульс, скорости после взаимодействия. Рассчитыва¬ется время их движения до находящихся в камере объектов. Из времени движе¬ния всех сферических тел выбирается минимальное и процедура расчета повто¬ряется. Если объектом взаимодействия является частица материала, то с исполь¬зованием математической модели процесса измельчения рассчитывается про¬цесс её разрушения. При взаимодействии частицы с устройством , классифици¬рующим материал, определяется вероятность её прохождения через его отвер¬стия. Для этого используется математическая модель процесса перемещения частицы из шароматериальной загрузки через отверстия устройства. Частица удаляется или возвращается в устройство. При возврате для неё рассчитываются параметры взаимодействия с устройством и время движения до всех объектов.

10

Рисунок 1. Алгоритм расчёта параметров протекающих в корпусе ШМ основных процессов, «затрачиваемой» мощности, динамических нагрузок на её конструкцию

11

По достижении назначенного интервала времени с использованием сохра¬нённых значений параметров процессов рассчитываются «затрачиваемая» мощ¬ность, динамические нагрузки на конструкцию мельницы.

Выражение для определения времени движения сферического тела до вза¬имодействия с конусообразной бронефутерованной поверхностью камеры мельницы имеет вид:

(£y-(y^gy+[v?+v?-ys-g-tgieM-K2}t2 +

хгК+УгК'+ \Dlm/> -Г°/ a -tg0m ■z,' I• tg0m ■ Va

г +

(1)

\*r+x'-iA^-')/s#

o.

Здесь x'„ >",, z'j и Р^, Py, P,i - соответственно координаты центра масс сфериче¬ского тела в начальный момент времени и проекции скорости на соответствую¬щие оси; Dlm - внутренний диаметр в радиальной плоскости XOY (рису¬нок 2, a); D2m - внутренний диаметр в радиальном сечении, проходящем через центр масс сферического тела; вт - угол наклона образующей да-го конуса; rsi-радиус /-го сферического тела.

Выражение для расчёта времени движения сферического тела до взаимо-действия с установленной под произвольным углом ак к горизонтальной оси корпуса перегородкой (далее перегородка общего положения) имеет вид:

-sinat(z; + ^)

(sin(^ + Q^))(-x;-0) + cos(^ + Q^)U; + I/^-g^

(2)

+ Dpt±(St/2 + rsl) = 0. Здесь Q - угловая скорость вращения корпуса; для перегородки общего поло¬жения (рисунок 2, б): ак и х'к - углы наклона и поворота относительно продоль¬ной оси корпуса; Dpk - расстояние от начала системы координат до плоскости перегородки; 8 - толщина.

При ак = 90° иак= 270° перегородка общего положения представляет вер-тикальную перегородку; при ак= 0° и ак= 180° - это продольно расположенная перегородка, частью которой является лопасть продольного лопастного устрой¬ства; при других ак - это разновидности лопастных эллипсных энергообменных устройств. Так же могут рассматриваться конструкции бронефутеровок с мно¬гогранными поверхностями, или иных устройств, представляющих части пере¬городки общего положения или их комбинации. Решение уравнения (2) относи¬тельно / позволяет рассчитать время движения tpik сферического тела до взаимо¬действия с любой из рассмотренных конструкций.

Двухзаходная винтовая лопасть выполняется из стержней с радиусом rh Ось стержня проходит через точку /0, имеющую координаты хю, ую, гю. Он пред¬ставлен в виде направляющего вектора, характеризующегося проекциями ах0, ау0, ал на оси координат. Выражение для расчёта времени tsiK движения сфери¬ческого тела (координаты центра масс - хю, ую, zi0; скорости - ¥м, Viy0, Viz0; ра-

12

диус-вектор ?<) до взаимодействия с цилиндрическим стержнем общего поло-жения, расположенным во вращающемся корпусе, имеет вид:

(3)

\[ax0-sin(Q/) + ar0-cos(Q/)](za + Vlz0-t-zl0)-aJya + V^-t-^-[xl0-sin(Q/) + yl0-cos(Q/)] +

+ {a20(xa + Vlx0-t ~[xl0-cos(Q2t)- yl0-sm(Qj)])-[ax0-cos(Qj)- a^-smiQjif^z^ + V^-t - z,0))2 +

(7 i( ft1 г пі

+ \ал ■ cos(Q/) - ay0 ■ sm(Qf)\ \y,0 + Vv0-t-2—-[xl0- sm(Qf) + уш- cos(Q2f)\ -

-[ax0-sin(n2t) + al0-cos(n2t)](xl0 + Vlx0-t-[xl0-cos(n2t)-yl0-sin(n2^)f-(rsl + r,f = 0.

L &

а) б) в) n

Рисунок 2. Схемы: а) – конусообразных камер; б) – перегородки общего положения; в) – двухзаходной винтовой лопасти

Время движения сферического тела до взаимодействия с поверхностью двухзаходной винтовой лопасти находим из выражения:

{z,0+Va0-t-zl0)2

УІО+^О-І-Щ

(z -к \ (z к \

ax0-cos(nj+27T^ 3! + z„)-ay0-sm(nj + 2^^^ + X„)

(z — к \ (z к )

ax0 ■ sin(Qz/ + 2л-^ ^ + zj + ay0 ■ cos(Q/ + 2л-^ ^ + zj

x(xl0+VM-t)f -{r^+r,)2 = 0. (4)

Здесь для винтовой поверхности: lw - шаг; к3- координата начала; χw - угол по-ворота стержня с координатой к3 (рисунок 2, в).

Полученная математическая модель процессов пространственного движе¬ния сферических МТ и частицы материала в бронефутерованных камерах ци¬линдрической и конусообразной форм позволяет рассчитать временные интер¬валы их движения до взаимодействия с бронефутеровкой, различными кон¬струкциями устройств; установить скорости центра масс, координаты, угловые скорости вращения в любой момент времени движения, в том числе и в момент взаимодействия; а также перемещения за любой промежуток времени.

Глава 3. Моделирование процессов взаимодействия сферического тела с бронефутеровкой и устройствами

Разработана математическая модель процесса взаимодействия сферическо-

13

го тела с бронефутеровкой, устройствами различных конструкций в камере мельницы. Введены обозначения: Iz - момент инерции корпуса относительно оси Z; xs, ys - координаты точки взаимодействия (рисунок 3); Sx, Sy, Sz - проек¬ции импульса взаимодействия на соответствующие оси; пх, пу, nz, тх, ту, TZ, Ъх, Ъу, bz - проекции единичных векторов локальной системы координат; S„, ST, Sb -проекции импульса взаимодействия на соответствующие оси локальной систе¬мы координат;/- коэффициент трения скольжения; к - коэффициент восста¬новления при ударном взаимодействии; для /-го сферического тела: да, - масса, /, - момент инерции, Vim ViT, Vib - проекции скорости центра масс на соответству¬ющие оси; со І - проекция угловой скорости на соответствующие оси. За локаль¬ную принята система координат с началом в точке взаимодействия и направле¬нием осей: п - вдоль нормали взаимодействия, г- вдоль вектора относительной скорости, Ъ - перпендикулярно осям лиг. При изменении положения места вза¬имодействия происходит изменение проекций единичных векторов ( пх, Пу, nz, г\*,

ту, тг, Ъх by, bz) локальной системы координат и координат точки взаимодействия (xs и у,). Индексы параметров обозначены цифрами: 1 - для момента обращения силы трения в ноль, 0 и 2 - до и после взаимодействия.

Выражения для определения импульсов ударного взаимодействия и эф¬фективного коэффициента трения скольжения ц имеют вид:

St=1-S„, (5)

{ХЛ-УЛ)

+v\_

{ХЛ~УЛ)

(\*,

У,-Тг)

(6)

f,

(Чг, "Л1\*)

{Х,т,-У,т.)

7 J

2 m

77 = min

+ K

(хгпУ-У\*л)

-(l + k)(vt0x-Q0(x,.n

У.-п.,

))

6„ =

у S X

1 {хЛ~Ул) (vrtt)/ ч

— П \х, -га,, - у, га,

mi lz

Здесь VT = Vi0t + rsfol0b -Qd(TyXs -zxys); Vn = {\+ k)(Vl0n -Qdpcs-ny - ysnx)).

Послеударные скорости корпуса и сферического тела определяются как:

(7)

(8)

mj m.

V, a>„

r.S

St T

(9)

Разработана методика определения динамических нагрузок на любой уча¬сток поверхности бронефутеровки, внутримельничных устройств и корпуса ШМ, при их взаимодействии с шаровой загрузкой. Нагрузка от действия сфери¬ческих тел с силой F на участок поверхности площадью Q', выделяемый по предложенной схеме, определяется как q = F/Q'. Нормальная F„ и касательная FT составляющие силы F определяются как:

14

^

IX / ^; Fr= IX /Af. (10)

Здесь zf/ - время, за которое определяется нагрузка; п - количество взаимодействий со сферическими телами за время At; Sm и Sn- нормальный и касательный импульсы /-го взаимодействия.

Рисунок 3. Схема к расчёту

взаимодействий сферического

тела в камере мельницы

Импульсы сил взаимодействия сфе¬рических тел с бронефутеровкой и устройствами передаются цапфами корпу¬са на поверхности подшипников А и В (рисунок 3). Величины импульсов реакций опор SM, SAy, SAz, SBx, SBy определяем поль¬зуясь системой уравнений (11), а дей¬ствующих на поверхности в осевом и ра¬диальном направлениях сил F^, FAy, FAz, FBx, FBy - из выражений (12): [Sx = nS+zS,

\Sz

иЛ+тЛ

IX

Z$

IX

1=1

lAy

Вх

(=1

; FAx

(=1

F

;FAy=

At

At

Ay

By

At

S S

IX

УА

IX

(12)

(11)

F

By

(=1

Zs^y

(=1

F =

At

At

/

;

xsSz-zS I

Полученная математическая модель позволяет рассчитать послеударные скорости центра масс сферического тела, угловые скорости вращения, импуль¬сы взаимодействия с бронефутеровкой, различными устройствами.

Для расчёта полной мощности, «затрачиваемой» при взаимодействии МТ с бронефутеровкой, перегородками, устройствами и ее составляющих, использу¬ем известное выражение, основанное на энергетическом принципе:

P

IK),

//.

(13)

Здесь AE?iT- изменение кинетической энергии корпуса за;-й удар /-го сфериче¬ского тела; / - время моделирования установившегося движения сферических тел; п - количество их взаимодействий с бронефутеровкой корпуса и внутри-мельничными устройствами за время /.

Изменение кинетической энергии корпуса определим как:

\\_s, {щ -УЛ)+^ {vy -УЛ)]

(14)

+Qr

Д£\*

2I

.. [s, {щ -ул)+8г (vy -^л).

15

Разработаны, основанные на полученных математических моделях и из-вестной модели взаимодействия сферических тел, условия компьютерной реа-лизации процессов пространственного движения мелющих тел и частиц матери¬ала, их взаимодействия с устройствами, бронефутеровкой, друг с другом в ШМ.

Глава 4. Моделирование процессов измельчения и классификации ма¬териала в мельнице

Для обеспечения совмещения процессов классификации мелющих тел по размерам; измельчения материала, выделения из шароматериальной загрузки частиц определённых размеров, их транспортирования в направлении от загру¬зочной части ШМ разработаны патентно-защищённые конструкции внутри-мельничных классифицирующих устройств. Предложено объединение этих устройств в группы по технологическому назначению.

В качестве параметра, характеризующего процесс разрушения частицы ма¬териала сферической формы при её взаимодействии с другой частицей, МТ, устройством принято критическое значение скорости Vf. Введём начало декар¬товой системы координат в точку взаимодействия частицы материала массой т1 с другим телом, ось OY направим к центру частицы. Выражение для определе¬ния критического значения скорости разрушения имеет вид:

1-А -г-пкр

укР = 2 лвз х °І . (15)

\ т2

Здесь /' принимает значения х, у, z; для измельчаемой частицы материала: Авз -площадь поверхности её взаимодействия с другим телом; х - расстояние от точ¬ки контакта с телом в начальный момент взаимодействия до находящейся в ней равновесной трещины; <т/ф - компоненты тензора напряжений в частице, т2 -масса взаимодействующего тела.

Компоненты главной диагонали тензора критического напряжения:

а«Р = а«Р = k(2-v1)M-ae^~. а«р = \ W-a0-E1 (16)

z У 2-108-4(1-^) ; ' ^108-^(1-^).

Здесь для материала измельчаемой частицы: Е, - модуль Юнга; v- коэффициент Пуассона; ц - постоянная Ламе; ае0 - среднее межатомное расстояние; ЬБ - дли¬на эллипсообразной тонкой трещины в бесконечно большом теле.

Длины трещин в бесконечно большом теле ЬБ и теле с конечными размера¬ми - LK определяются выражениями:

ЬБ К 2 2. У1г1ІґксгІм„ \EVA,

\*(O2 3 ^3

(17) V^-TT-r^E^-khT 2 1^h (18)

2і і і 4 і L„ =2к -є.

Здесь гг - радиус сферической частицы; V1 и VB03 - объёмы разрушаемой части-цы и области её деформации; h и12 - размеры деформации частицы и взаимо-

16

действующего тела; ум - поверхностное натяжение; кб - постоянная Больцмана; Ь - постоянная Планка; аВМАХ - максимальная величина напряжения, возника¬ющая от воздействия внешней силы; Г- температура.

С использованием полученной математической модели исследованы осо¬бенности процессов разрушения частиц материала при взаимодействии с ме¬лющими телами и поверхностью внутримельничного устройства.

В качестве характеристики процесса перемещения, через классифицирую¬щие отверстия устройств, находящейся в шароматериальной загрузке частицы материала принята вероятность ее перемещения. Поверхность устройства рас¬сматривается разбитой на Ыяч элементарных прямоугольных ячеек, соосных классифицирующим отверстиям. Приняты обозначения. Диаметр частицы мате¬риала - d; скорость её центра масс - ^ . Для классифицирующих отверстий: при

эллипсной форме Ъ и / -длины большой и малой осей, при прямоугольной фор-ме Ъ и / - его ширина и длина. Для элементарной выделенной ячейки: L - длина; В - ширина. Выражение, устанавливающее вероятность нахождения частицы над отверстием и её перемещения через /'-е отверстие прямоугольной, эллипсо-образной или круглой форм классифицирующего устройства, имеет вид:

P(Eventlr,Event2) = \PE, npuV;<0, (19)

І0, npuV'>0.

Nm + '^-l-b).(N„-i)\

К

PE

{b\v;\-d.W+K){i\v;\-d.№+K)- (20)

(L-B)

Здесь |V'X|, |Vy|, |VZ| - величины проекций скорости центра масс частицы на со-ответствующие оси; к: - параметр, характеризующий вид отверстия.

Выражение, устанавливающее вероятность нахождения сферической ча-стицы материала над отверстием и её перемещения через /'-е щелевое отверстие классифицирующего устройства колосникового типа имеет вид:

P{Event3^Eventi) = \PKE, npuV;<0; (21)

10, npuV'>0.

Pz,

-■^(-^)'■(„„-,Л і d.^Tv

(22)

Здесь кК - параметр, характеризующий поперечный профиль колосника; дп -ширина щелевого классифицирующего отверстия; пк - количество колосников.

Глава 5. Методики экспериментальных исследований и моделирования процессов, характеристика оборудования

Исследование параметров протекающих в ШМ процессов осуществлялось c использованием общепринятых методик на разработанных эксперименталь¬ном помольном комплексе и мельнице D×L=0,45×0,5 м. Помольный комплекс (рисунок 4) включал мельницы D×L=1×0,6 м и D×L=0,5×1,5 м; комплекс обра¬ботки информации; ленточный весовой дозатор; систему аспирации, состоящую из вентилятора высокого давления ВВД-5, циклона ЦН-15П-400, пылеулавли-

17

вающих агрегатов ЗИЛ-900М.

Экспериментальные ШМ непре¬

рывного действия оснащены ре¬

гулируемыми электроприводами,

комплектами внутримельничных

классифицирующих, энергооб-

Рисунок 4. Экспериментальный помольный комплекс

менных устройств. Мельницы

D×L= 1×0,6 м и D×L=0,5×1,5 м

использовались для исследова¬

ния процессов соответственно

грубого и тонкого помола мате¬

риалов. Мельница D×L=

0,45×0,5 м использовалась для

исследования процесса сегрега¬

ции МТ, изменений мощности, потребляемой электродвигателем. Эксперимен¬

тальные установки и устройства изготовлены в соответствии с условиями, необ¬

ходимыми для физического моделирования основных процессов, протекающих

в ШМ. Комплекс обработки информации использовался для контроля и преоб¬

разования поступающих с датчиков электрических сигналов в сигналы цифро¬

вого кода, а затем в цифровой и графический виды.

Исследование параметров процессов разрушения сферических частиц раз¬личных материалов осуществлялось на специальном стенде.

Для исследований использовались материалы различной размалываемости: мел, известняк, мергель, клинкер, кварцевый песок, известь, шамот.

Для проведения численных компьютерных экспериментов по реализации в мельнице основных процессов; определения её рациональных конструктивно-технологических параметров, напряжённо-деформированного состояния эле¬ментов конструкции применялось соответствующее программное обеспечение.

Глава 6. Исследования процессов движения мелющих тел в корпусе с внутримельничными устройствами

С использованием описанного во второй главе метода расчета проведены численные компьютерные эксперименты по реализации в мельницах различных типоразмеров взаимосвязанных процессов движения МТ, их взаимодействия друг с другом, бронефутеровкой корпуса и устройствами. Выполнены исследо¬вания параметров процессов движения МТ. Обоснована целесообразность при¬менения устройств, увеличивающих подвижность МТ, изменяющих скоростные режимы их движения при вращении корпуса.

Установлено, что днища ШМ и вертикальные перегородки способствуют движению МТ не только в поперечном, но и продольном направлениях. Это приводит к перемещениям МТ в верхней части контура мелющей загрузки в направлениях от днищ и перегородок к центральной части камеры, в нижней части – в обратных направлениях. Средние значения продольных составляющих

18

скоростей VZcn центров масс МТ выделенных у днищ и перегородок объёмов по абсолютной величине преимущественно несколько больше, чем в центральной части цилиндрической камеры. Их абсолютные величины преимущественно меньше (от нескольких раз, до десяти и более) соответствующих им средних значений поперечных составляющих скоростей. В цилиндрической камере вли¬яние днищ и вертикальных перегородок на продольное движение МТ идентич¬но. В конусообразной - днище или перегородка большего диаметра интенсив¬нее воздействуют на МТ и при достижении значений угла наклона образующей внутреннюю поверхность бронефутеровки близких квк = 15°, они доминирую¬ще воздействуют на продольное движение МТ.

0 90 180 270 360 0 90 180 270 360

Угол поворота корпуса, Q', град Угол поворота корпуса, Ω', град

Рисунок 5. Изменение ¥'ш.ср в выделенных в камере мельницы D×L=2×10,5 м

объемах при (р = 0,3, ці = 0,76^ и установке: а) - лопастных эллипсных

четвертькольцевых устройств; б) - двухзаходных винтовых лопастей; в) -

лопастных эллипсных сегментов; г) - наклонной межкамерной перегородки;

координаты выделенных объемов: 1 - z = (0; 0,32) м; 2 - z = (0,32; 0,64) м; 3 - z =

(0,64; 0,96) м; 4 - z = (0,96; 1,28) м; 5 - z = (1,28; 1,6) м; 6 - z = (1,6; 1,92) м; 7 - z =

(1,92; 2,24) м; 8 - z = (2,24; 2,56) м; 9 - z = (2,56; 2,88) м; 10 - z = (2,88; 3,2) м

Для мельниц с цилиндрическими камерами, оснащёнными ЛЭУ, и без них, при вращении корпусов исследованы количественные распределения МТ и из¬менения средних значений их скоростей в выделенных в продольном направле¬нии камер объёмах. Установлены и обоснованы их закономерности. Определе¬ны области выраженного влияния лопастных энергообменных устройств (1ВлЛЗУ)

1,15

1

0,85 0,7

0,55 0,4

1,15

1

0,85

0,7 0,55

0,4

а

Уте м/с

• !->•\*•< ^-КК,

^™^,

2 9Х

0 90 180 270 360

Угол поворота корпуса, Ω', град

У'иТгр, м/с

,ъ AQ 8\ Ь

с\*?пГ / j

6 \*\*%

1,15

1

0,85

0,7 0,55

0,4

1,15

1

0,85

0,7 0,55

0,4

б)

^W.CP, м/с

<\/lj 4 10 3 /

\*p\*\*^ 5 ^ ^-6

0 90 180 270 360

Угол поворота корпуса, Ω', град

г

У'ит,„, м/с

19

на характеристики процесса движения МТ. В зависимости от вида их воздей-ствия на МТ при вращении корпуса отличаются цикличностью, интенсивно-стью, направлением, величиной 1ВЛ.ЛЭУ, что приводит к соответствующим изме¬нениям распределений МТ и средних значений их скоростей V'MT.cp (рисунок 5). Это позволяет осуществлять выбор устройств с учётом типоразмера мельницы, свойств и стадии измельчения материалов. Области выраженного их влияния на характеристики процесса движения МТ в 1,5…2,5 раза превышают величины проекций устройств на продольную ось корпуса 1ЛЭУ.

В зависимости от вида ЛЭУ, расположения в камере выделенных объемов МТ, принадлежащих областям выраженного влияния ЛЭУ на МТ, при враще¬нии корпуса количества МТ в этих объемах изменяются на 14…220 %, а сред¬ние значения их скоростей - на 12…67 %. Средние значения скоростей МТ в камере мельницы D×L=2×10,5 м с лопастными эллипсными четвертькольцевы-ми устройствами, двухзаходными винтовыми лопастями, лопастными эл¬липсными сегментами и наклонной межкамерной перегородкой превышают этот показатель для камеры без ЛЭУ соответственно на 6, 22, 44 и 22 %.

Для описания распределения мелющих тел по размерам в камерах ШМ по¬лучено аналитическое выражение коэффициента сегрегации МТ. Выражение в относительном виде (-1≤ ^≤1):

N

N

N

НN2>rsi Xi-£rsi£Xi \/ N2>rs i2- S

i=1

(23)

Здесь N - количество МТ; X, - величина, характеризующая положение центра масс МТ (для продольной сегрегации - координата z, для поперечной - расстоя¬ние до центра масс загрузки).

Исследованы закономерности изменения поперечной и продольной сегре¬гаций МТ в цилиндрической и конусообразной камерах в зависимости от пара¬метров ШМ. Обосновано и теоретически подтверждено наличие продольной

-•Н

&,град

Рисунок 6. Зависимость iv от в

иЬ/D в конусообразной камере

мельницыМ, =2×10,5 м при

<р = 0,3; у/= 0,76 у/,„

сегрегации МТ по размерам в конусообраз¬ной камере, описан механизм их распреде¬ления от крупных к мелким в направлении от большего днища. Исследована продоль¬ная сегрегация МТ в камере. Получены уравнения регрессии, позволяющие опреде¬лять изменение коэффициента продольной сегрегации £пр. Графическое представление изменения функции от 6К и Zк/Dк приведено на рисунке 6. Установлены области рацио-нальных значений факторов: относительной скорости вращения корпуса - цгк = (0,7… 1)^; угла наклона вк = 14… 18°; ко¬эффициента загрузки МТ - срк = 0,26…0,32; соотношения длины камеры и диаметра большего основания L/Dк = 0,75...0,92;

20

обеспечивающих 4р = - 0,455...- 0,34.

Теоретически подтверждено наличие в камерах поперечной сегрегации МТ по размерам. Обоснован механизм их поперечной сегрегации при различных режимах движения загрузки. Получено уравнение регрессии, характеризующее изменение Споп в диапазоне <Гиои = - 0,114…0,02 при варьировании коэффициента загрузки мелющих тел срц и относительной частоты вращения корпуса цгц в диа¬пазонах срц = 0,2… 0,4; щц = (0,5… 1)щкр.

Глава 7. Исследование процессов взаимодействия мелющих тел с бронефутеровкой и внутримельничными устройствами

Проведены, с использованием описанного во второй главе метода расчета, численные компьютерные эксперименты по реализации в мельницах различных типоразмеров взаимосвязанных процессов движения МТ, их взаимодействия друг с другом, бронефутеровкой корпуса, устройствами. Обоснована целесооб¬разность применения ЛЭУ, увеличивающих передачу МТ движения в продоль¬ном направлении, повышающих энергонапряженность мелющей среды.

В цилиндрической камере днища (вертикальные перегородки) обеспечи-вают МТ, находящимся в выделенных возле них объёмах, большие средние зна¬чения кинетической энергии по сравнению с удалёнными. При коэффициенте загрузки мелющих тел срц = 0,3 и относительной частоте вращения корпуса у/ц = 0,16щкр превышение составляет до 1,5 раз.

При взаимодействии МТ друг с другом, бронефутеровкой и внутри-мельничными устройствами изменяется количество их кинетической энергии. Разницу между кинетической энергией МТ до взаимодействия и после него, будем называть «выделяемой» МТ энергией (Е^), которая может быть израс-ходована на разрушение частицы материала, потери при неупругом ударе, износ взаимодействующих тел и т.д. Исследованы при вращении корпуса закономер¬ности распределения в объемах, выделенных в продольном направлении цилин¬дрических камер, количественных значений «выделяемой» при взаимодействии МТ друг с другом, ЛЭУ, бронефутеровкой энергии Е^. Воздействия устройств на МТ, отличающиеся цикличностью, интенсивностью, направлением, величи¬ной области выраженного влияния lВЛ.ЛЭУ, приводят к соответствующим измене¬ниям Е^ь (рисунок 7). Это позволяет осуществлять выбор устройств с учётом типоразмера ШМ, свойств и стадии измельчения материалов. В зависимости от вида ЛЭУ величины Е^ за период оборота корпуса изменяются, в областях их выраженного влияния на характеристики процесса движения МТ, на 12…95%. Величины «выделяемой» МТ в камерах с ЛЭУ энергии, в зависимости от вида устройств, на 2,3… 13,7 % превышают аналогичный показатель для ШМ без ЛЭУ, что характеризует более энергонапряженные режимы движения в них МТ.

Обосновано, что при определении полной «затрачиваемой» мощности для ШМ с ЛЭУ её нельзя рассматривать как сумму полной «затрачиваемой» мощ¬ности для ШМ без ЛЭУ и мощности, «затрачиваемой» при взаимодействии МТ с ЛЭУ. При установке ЛЭУ, в зависимости от вида, увеличение полной «затра-

21

3400 -2800 < 2200 - ~~^5 6—у

% г\ з

■ г j

У

1600 - -

l-^ч». Ло-~-~ >^ ^ \S

8 3

/\ \

ю-" Ъ\*-^'~ ч6 н 5

чиваемой» мощности составляет от 2 % до 13,5 %. Величины мощности, «затра¬

чиваемой» при взаимодействии МТ с ЛЭУ, составляют от полной «затрачивае¬

мой» мощности от 6,3% до 26 %. Расчеты показывают, что при оснащении

двухкамерной ШМ D×L=2×10,5 м двухзаходными винтовыми лопастями с дли¬

ной, равной четверти их шага, углом подъёма винтовой линии /3 = 22°30' при <р =

0,3, цг = 0,16щкр потребляемая электродвигателем мощность составляет 408 кВт,

без этих устройств - 384 кВт. Эти значения, по отношению к полученным в

промышленных условиях, соответственно отличаются на 11,5 % и 10,6 %.

4000 Евыд, Дж а) Евыд, Дж б)

3400

2800 2200 1600 1000

0 90 180 270 360 0 90 180 270 360

Угол поворота корпуса, Q', град Угол поворота корпуса, Q ',град

Рисунок 7. Распределение Евыд в выделенных в камере мельницы D×L=2×10,5 м

объемах при <р = 0,3, ці = 0,76^ и установке: а) - двухзаходных винтовых лопастей;

б) - лопастных эллипсных сегментов; координаты выделенных объемов: 1 - z =

(0; 0,32) м, 2 - z = (0,64; 0,96) м, 3 - z = (1,28; 1,6) м, 4 - z = (1,6; 1,92) м,

5 - z = (2,24; 2,56) м, 6 - z = (2,88; 3,2) м

P, Вт

305000

22000

290000

19500

275000

17000

260000

14500

245000

P, Вт

4\ А

V зі ; 1 У\ j., ч

1 \ >' і 'МЛ'

1т\*\* \* ' 1 1 1

і W \* в

12000

0 90 180 270 360 Угол поворота корпуса, П', град

0 90 180 270 360

Угол поворота корпуса, і Г, град

Рисунок 8. Изменения мощности, «затрачиваемой» при вращении корпуса (<р= 0,3;

¥= 0,76^) и взаимодействии МТ с бронефутеровкой и устройствами в мельнице

D×L=2× 10,5 м: 1, 2, 3, 4 - при установке двухзаходных винтовых лопастей; 1', 2', 3' -

без энергообменных устройств, 1' - общей; 2, 2' - с бронефутеровкой корпуса; 3, 3' - с

выходной решеткой, вертикальной перегородкой и днищем; 4 - с винтовыми лопастями

При повороте корпуса полная «затрачиваемая» мощность и её составляющие имеют колебательный характер (рисунок 8). Установлены и обоснованы зако-номерности их изменения. В сравнении с ШМ без ЛЭУ, при установке в корпус этих устройств увеличение отклонений полной «затрачиваемой» мощности со-

22

ставляет до 3,4 %. Уменьшать отклонения позволяет симметричное расположе¬ние ЛЭУ в проекции на плоскость, перпендикулярную продольной оси корпуса. В зависимости от конструкции ЛЭУ, средние значения абсолютных вели¬чин осевых составляющих динамических нагрузок F'zcp составляют от 4,4 % до 25 % средних значений радиальных составляющих Fr.cp. При вращении корпуса с ЛЭУ и без них радиальные Fr1, Fr2 и осевые Fz составляющие динамических нагрузок на подшипники корпуса, возникающие от взаимодействия МТ с его бронефутеровкой и ЛЭУ имеют колебательный характер (рисунок 9). Установ¬лены и обоснованы закономерности их изменения. Для ШМ одного типоразме¬ра с различными вариантами установки ЛЭУ отклонения колебаний Fr1, Fr2 от средних значений составляют 4,5...17,1 %.

189000 183000 177000 171000 165000

F, Н

б;

9000 6000 3000 0 -3000 -6000 -9000

a)

F, Н

^1

1 '.' fyw, ■ /

VV',' L-2

0 90 180 270 360 Угол поворота корпуса, Ω', град

в;

\ \ ЛЛ<І

' \* 1 / «Wr-

її '' \

— 3 ^ -3'

0 90 180 270 360

Угол поворота корпуса, Ω', град

189000

183000

177000

171000

165000

0 90 180 270 360 Угол поворота корпуса, Ω', град

Рисунок 9. Изменения

динамических нагрузок на опоры

мельниц D×L=2×10,5 м при <рц = 0,3; у/ц =

0,76^ и вращении корпусов: 1, 2, 3 - с

двухзаходными винтовыми лопастями;

1', 2', 3' - без энергообменных устройств;

а) и б) - радиальных нагрузок: 1 и 1' - Frl

и F'rl на первые опоры, 2 и 2' - Fr2 и F'r2 на

вторые опоры; в) - осевых: 3 и 3' - Fz и F\

Глава 8. Комплексные исследования процессов измельчения

материалов

С использованием описанного во второй главе метода расчета; физическо¬го моделирования; математического планирования экспериментов проведены исследования процессов измельчения материалов различной размалываемости в мельницах, оснащенных классифицирующими и энергообменными устройства¬ми. Получены уравнения регрессии, адекватно позволяющие устанавливать ко¬личественные и качественные закономерности процессов измельчения. Доказа¬на целесообразность организации внутримельничной классификации материала и изменяющихся режимов движения МТ в ШМ. Эффективные условия помола в ШМ с устройствами обеспечиваются с учетом стадийности ее использования в

23

помольном комплексе, требований технологического регламента предприятия, физико-механических характеристик и способа измельчения материалов.

Разработаны рекомендации применения в ШМ различных типоразмеров конструкций и схем установки устройств, реализующих процессы классифика¬ции материала и мелющих тел, изменяющих при вращении корпуса режимы движения МТ. Применение энергообменного классифицирующего устройства целесообразно в ШМ грубого помола материалов средней и пониженной разма-лываемости комплекса одностадийного цикла измельчения или в ШМ комплек¬са двухстадийного цикла измельчения, с последующим тонким домолом грубо-молотого материала в другой ШМ. Цилиндрическое классифицирующее устройство целесообразно использовать при грубом и тонком помолах материа¬лов средней и пониженной размалываемости. При помоле материалов повы-шенной размалываемости рационально применение конусообразного классифи¬цирующего устройства. Для грубого помола материалов целесообразно исполь¬зовать ШМ с соотношением длины и диаметра корпуса LID < 1,5 и его оснаще¬нии цилиндрическим классифицирующим устройством или конусообразным. Тонкий помол материалов в ШМ открытого цикла измельчения целесообразно осуществлять при соотношении LID > 3, ее трехкамерном исполнении и уста¬новке одного из этих устройств. Установлено, что для достижения наибольшей эффективности процесса измельчения материалов в ШМ целесообразно обеспе¬чить: отношение длины камеры устройства к диаметру для цилиндрического и конусообразного классифицирующих устройств - L/D = 0,43…0,5, для энерго¬обменного классифицирующего устройства - L/D = 1,14… 1,27; относительную частоту вращения -цг= (0,72…0,8)^; коэффициент загрузки мелющих тел - ср = 0,26… 0,32; ширину его классифицирующих отверстий - а = (3… 4,5)∙10"3 м.

При тонком помоле мергеля до остатка на контрольном сите R02 = 6 % и оснащении ШМ конусообразным классифицирующим устройством достигнуто увеличение производительности gпр на 9,2% и снижение удельного расхода электроэнергии ^пр на 19,4%; при помоле (R0os = 10 %) клинкера в ШМ с цилин¬дрическим классифицирующим устройством - соответственно на 8,7% и 9,3%. При оснащении энергообменным классифицирующим устройством ШМ грубо¬го помола для комплекса ШМ двухстадийного цикла тонкого помола клинкера (Roos = 10 %) достигнуто увеличение Qпр на 13% и снижение <7пр на 18,7%.

Произведен расчет нагрузок и их распределения на конструкции цилин-дрического классифицирующего устройства и лопастных эллипсных сегментов. В программной среде Unigraphicx (NX) по методу конечных элементов выпол¬нен расчет их напряженно-деформированного состояния, доказана эксплуатаци¬онная надежность.

Разработан метод расчёта конструктивно-технологических параметров ШМ с энергообменными и классифицирующими устройствами, позволяющий:

- осуществлять компьютерное моделирование взаимосвязанных процессов движения МТ,частиц материала; их взаимодействия друг с другом, бронефуте-ровками, устройствами; измельчения, классификации материала в мельнице;

24

- устанавливать, в необходимый момент или промежуток времени, харак¬теризующие процессы параметры (со,, V', S, АЕ5,,, Е^, V'MT.cp, V,Kp, £ Л и др.);

- осуществлять поиск рациональных конструктивно-технологических па-раметров ШМ (щ, ср, L/D, ак, а, Д в, 1Вл.ЛЭу и др.), обеспечивающих повышение производительности, снижение удельного расхода электроэнергии;

- определять для ШМ значения полной «затрачиваемой» мощности; нагру¬зок и их распределения на внутримельничные устройства, корпус, его опоры, бронефутеровки;

- применять существующие методы, методики для выполнения прочност-ных расчетов внутримельничных устройств, корпуса, его опор, бронефутеровок по значениям нагрузок и их распределениям; расчёта привода по значению пол¬ной «затрачиваемой мощности» и частоте вращения корпуса.

Сочетание изложенных неформальных и формальных средств описания решаемых в диссертации задач, подразумевающих применение предложенных методов, методик и математических моделей, представляет собой методологи¬ческие основы проектирования шаровых мельниц с энергообменными и клас¬сифицирующими устройствами.

Глава 9. Опытно-промышленные испытания и внедрение результатов ис-следований

Проведены промышленные испытания мельниц с различными конструкци¬ями устройств, подтверждающие эффективность организации устройствами изменяющихся режимов движения МТ и внутримельничной классификации материала.

На мельницах Карачаево-Черкесского цементного завода D×L=4×13,5 м

до измельчения известняково-глинистого шлама (до R02 < 6 %) проведены круп¬

номасштабные промышленные испытания различных конструкций ЛЭУ и схем

их установки. Построено уравнение регрессии, адекватно описывающее зави¬

симость коэффициента изменения произ¬

водительности Кизм от характеристик гру-

бомолотого шлама: титра Тт, остатка на

сите R02, количества огарок К. Получены

уравнения аппроксимации, характеризую¬

щие изменения потребляемой электродви¬

гателями мощности Р, производительности

Qпр, удельного расхода электроэнергии qпр

от коэффициента ср загрузки МТ. Исполь¬

зование разработанных устройств на ШМ

D×L=4×13,5 м обусловлено максимальным

в отечественной промышленности типо-

Рисунок 10. Корпус мельницы размером, их повышенными производи-

D×L=4×13,5 м с лопастью тельностью (более 300 т/ч), расходом элек-

двухстороннего действия и троэнергии (более 8,5 млн. кВт-ч в год), а

лопастными эллипсными сегментами

25

также важностью для науки и практики получения экспериментальных данных в реальных промышленных условиях.

Оснащение лопастными эллипсными сегментами мельницы D×L=4×13,5 м обеспечивает повышение её производительности с 276,7 т/ч до 312,5 т/ч (на 12,9 %) и снижение удельного расхода электроэнергии с 9,3 кВт∙ч/т до 8,44 кВт∙ч/т (на 9,2 %). Использование рассматриваемых устройств и схемы установки целесообразно в случае многокамерного исполнения барабана ШМ или при отношении его длины к диаметру от 1,5 до 2 раз.

Оснащение лопастными эллипсными сегментами и лопастью двухсторон¬него действия (рисунок 10) мельницы D×L=4×13,5 м обеспечивает повышение производительности на 23,2 % - с 276,7 т/ч до 340,84 т/ч и снижение удельного расхода электроэнергии на 13 % - с 9,3 кВт∙ч/т до 8,09 кВт∙ч/т. Применение устройств и схемы установки целесообразно в условиях мокрого способа из¬мельчения материалов, содержащих компоненты или включения пониженной размалываемости на ШМ с длиной барабана, превышающей в три и более раз его диаметр.

Проведены испытания на ОАО «Завод силикатных строительных материа¬лов» мельницы D×L=2×10,5 м сухого помола известково-цементно-песчаного вяжущего (до удельной поверхности Sуд > 340 м2/кг), при её оснащении двухза-ходными винтовыми лопастями (рисунок 11). Установка устройств обеспечива¬ет повышение производительности ШМ с 9,5 т/ч до 11,7 т/ч (на 23,1 %), сниже¬ние удельного расхода электроэнергии с 45,2 кВт∙ч/т до 35,7 кВт∙ч/т (на 21 %). Отклонения расчетных средних значений мощности, потребляемой электродви¬гателем как оснащенной энергообменными устройствами мельницы, так и без них, не превышают 11,5 % от полученных в промышленных условиях. Исполь¬зование этих устройств и схемы установки целесообразно на стадии грубого помола материалов средней и пониженной размалываемости. Они могут приме¬няться как в однокамерных мельницах грубого помола материалов, так и в ка¬мерах грубого помола многокамерных мельниц тонкого помола.

Использование результатов исследований по изменению ассортимента и массы мелющей загрузки на мельнице открытого цикла измельчения клинкера

D×L=3,2×15 м ЗАО «Катавский цемент» обеспечило увеличение её производительности с 39,3т/ч до 43,78т/ч (на 11,4%) и снижение удельного расхода электроэнергии с 48,42 кВт∙ч/т до 43,08 кВт∙ч/т (на 11%) при получении цемента марки 400-Д0.

Проведены производственные испытания на ООО «АЛНА» мель¬ницы D×L= 1×0,6 м с цилиндриче-Рисунок 11. Корпус мельницы D×L=2×10,5 м ским классифицирующим устрой-с двухзаходными винтовыми лопастями

26

ством. Ее применение на стадии грубого помола в технологическом комплексе переработки шамотного боя обеспечивает подготовку 87 кг/ч заполнителя ша¬мотного ЗШБ класса 6 при удельном расходе электроэнергии q = 8,72 кВт∙ч/т и повышение производительности ШМ D×L=0,5×0,5 м тонкого помола шамото-цементной шихты (Л0063< 2 %) с 17,16 кг/ч до 25,73 кг/ч (на 49,9%), снижение удельного расхода электроэнергии с 55,82 кВт∙ч/т до 45,51 кВт∙ч/т (на 18,4%).

По запросу ЗАО «Катавский цемент» разработана и передана техническая документация на цилиндрическое классифицирующее устройство для цемент¬ной мельницы D×L=3,2×1,5 м и техническая документация на конусообразное классифицирующее устройство для сырьевой мельницы D×L=3,7×8,5 м. Внед¬рение этих устройств осуществляется в соответствии с программой модерниза¬ции технологического оборудования предприятия.

Экономический эффект от разработанных и внедренных научно-технических разработок составляет 7 млн. рублей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ Итоги выполненного исследования

1. Разработаны научные и методологические основы проектирования ша¬ровых мельниц с энергообменными и классифицирующими устройствами, до¬казана целесообразность изменения скоростных характеристик процесса движе¬ния МТ при вращении корпуса и удаления устройствами из зоны измельчения мелкой фракции материала по мере ее образования.

2. Разработан метод расчета параметров процессов пространственного дви¬жения мелющих тел и частиц материала, их взаимодействия с различными кон¬струкциями бронефутеровок, внутримельничных устройств, друг с другом; из¬мельчения частиц материала, их классификации; расчёта «затрачиваемой» мощ¬ности, динамических нагрузок на конструкцию мельницы. Метод основывается на объединении процедурой реализации, на основе объектно-ориентированного представления, разработанных математических моделей, описывающих пара¬метры рассматриваемых процессов. Получены аналитические выражения для расчета энергии взаимодействий МТ и частицы материала с различными кон¬струкциями бронефутеровок и устройств; передаваемых корпусом мельницы на подшипники динамических нагрузок; методика расчёта динамических нагрузок на конструкции корпуса и устройств. С использованием этого метода расчета выполнены исследования параметров процессов движения МТ и рассматривае¬мых взаимодействий (со,, V', S, F, Р, А£?, Е^, V'MT.cp, V,Kp, ^и др.). Установлено влияние днищ, вертикальных перегородок, лопастных энергообменных, класси¬фицирующих устройств на рассматриваемые процессы. Обоснована целесооб¬разность применения внутримельничных устройств, увеличивающих подвиж¬ность МТ, изменяющих характеристики процесса их движения при вращении корпуса, повышающих энергонапряженность мелющей среды.

3. Для описания распределения МТ по их размерам в камерах мельницы получено аналитическое выражение коэффициента их сегрегации. Теоретически

27

подтверждено наличие поперечной сегрегации МТ в камерах мельницы, про-дольной сегрегации в конусообразной камере; обоснованы механизмы сегрега¬ций. Исследованы закономерности изменения поперечной и продольной сегре¬гаций МТ в цилиндрической и конусообразной камерах в зависимости от пара¬метров мельницы. Для описания поперечной сегрегации МТ в цилиндрической камере получено уравнение регрессии, характеризующее изменение ^по„ в диа¬пазоне 4оя= – 0,114…0,02 при варьировании р,и^,в диапазонах (рц = 0,2…0,4; щц = (0,5…1)цгкр. Для описания продольной сегрегации МТ в конусообразной камере получены уравнения регрессии, устанавливающие зависимость коэффи¬циента продольной сегрегации £„р от параметров мельницы. Установлены обла¬сти их рациональных значений: щк = (0,7… 1)^; срк = 0,26…0,32; угла наклона образующей камеры вк = 14… 18°; соотношения длины камеры и диаметра большего основания Lк/Dк = 0,75...0,92; обеспечивающих £„р = - 0,455... - 0,34.

4. Установлены и обоснованы, при вращении корпуса, закономерности из¬менений в выделенных в продольном направлении камер объёмах средних зна¬чений скоростей МТ, распределения количественных значений МТ и выделив¬шейся при их взаимодействии с устройствами, бронефутеровкой корпуса, друг с другом энергии Е^. Определены области 1ВлЛЭУ выраженного влияния ЛЭУ на характеристики процесса движения МТ. В зависимости от вида устройств, их воздействия на МТ при вращении корпуса отличаются цикличностью, интен¬сивностью, направлением, величиной 1ВЛ.ЛЭУ, что приводит к соответствующим изменениям средних значений скоростей МТ, количественных значений МТ и Е^ в выделенных объемах. Это позволяет осуществлять выбор устройств с учётом типоразмера мельницы, свойств и стадии измельчения материалов. Об¬ласти их выраженного влияния на характеристики процесса движения МТ в 1,5…2,5 раза превышают величины проекций устройств на продольную ось корпуса 1ЛЭу. В зависимости от вида устройств, расположения принадлежащих 1ВЛ.ЛЭУ выделенных объемов в камере, при вращении корпуса количества МТ в этих объемах изменяются на 14…220 %, средние значения их скоростей - на 12…67 %, а величины Е^ - на 12…95%. Средние значения скоростей МТ и величины «выделяемой» ими в камерах с ЛЭУ энергии, в зависимости от вида устройств, превышают аналогичные показатели для мельницы без ЛЭУ соот¬ветственно на 6… 22 % и 2,3… 13,7 %.

5. Установлены изменения полной «затрачиваемой» мощности и ее состав¬ляющих. Применение лопастных энергообменных устройств обеспечивает пе¬рераспределение взаимодействий МТ между устройствами, бронефутеровкой днищ, барабана, что приводит к соответствующим изменениям мощностей, «за¬трачиваемых» при этих взаимодействиях. При установке ЛЭУ, в зависимости от их вида, увеличение полной «затрачиваемой» мощности составляет от 2 % до 13,5 %. Величины мощности, «затрачиваемой» при взаимодействии мелющих тел с ЛЭУ составляют от полной «затрачиваемой» мощности от 6,3% до 26 %. Уменьшать колебания полной «затрачиваемой» мощности позволяет симмет-ричное расположение ЛЭУ в проекции на плоскость, перпендикулярную про-

28

дольной оси корпуса.

6. Исследованы изменения радиальных Frl, Fr2 и осевой Fz составляющих динамических нагрузок на опорный и опорно - упорный подшипники, возни-кающих от взаимодействия мелющих тел с ЛЭУ и бронефутеровкой корпуса при его вращении. Для корпуса с устройствами и без них Frh Fr2 и Fz имеют ко-лебательный характер. Для мельниц одного типоразмера с различными вариан¬тами установки ЛЭУ отклонения колебаний Frl, Fr2 от их средних значений со¬ставляют 4,5 %...17,1 %. В зависимости от конструкции ЛЭУ, средние значения абсолютных величин осевых составляющих динамических нагрузок F'zcp со¬ставляют от 4,4% до 25 % средних значений FKcp, что характеризует при уста¬новке в мельницах энергообменных устройств повышение продольного воздей¬ствия на мелющие тела.

7. С использованием разработанного метода расчета параметров процессов пространственного движения мелющих тел и частиц материала, их взаимодей¬ствия с различными конструкциями бронефутеровок, внутримельничных устройств, друг с другом; измельчения частиц материала, их классификации; расчёта «затрачиваемой» мощности, динамических нагрузок на конструкцию мельницы; физического моделирования; математического планирования экспе¬риментов исследованы процессы грубого помола материалов различной разма-лываемости в мельницах, оснащенных классифицирующими и энергообменны¬ми устройствами. Доказана возможность повышения производительности Qпр и снижения удельного расхода электроэнергии qпр при оснащении мельниц этими видами устройств с учетом физико-механических свойств измельчаемых мате¬риалов. Получены уравнения регрессии, позволяющие устанавливать количе¬ственные и качественные закономерности процессов измельчения. Установлено, что для обеспечения наибольшей эффективности процесса измельчения матери¬алов в мельнице с классифицирующими и энергообменным устройствами целе-сообразно обеспечить следующие параметры: ширину классифицирующих от¬верстий а = (3… 4,5)∙10-3 м; относительную частоту вращения корпуса мельницы щц = (0,72… 0,8)t//кр; коэффициент загрузки МТ ср = 0,26… 0,32; отношение длины камеры устройства к диаметру для цилиндрического и конусообразного класси¬фицирующих устройств - L/D = 0,43…0,5, для энергообменного классифици¬рующего устройства - L/D = 1,14… 1,27. При измельчении мергеля и оснащении мельницы конусообразным классифицирующим устройством достигнуто уве¬личение 2пр на 9,2% и снижение qпр на 19,4%; при измельчении клинкера в мельнице с цилиндрическим классифицирующим устройством - соответственно на 8,7% и 9,3%. При оснащении энергообменным классифицирующим устрой¬ством мельницы грубого помола комплекса двухстадийного цикла измельчения клинкера достигнуто увеличение его 2пр на 13% и снижение qпр на 18,7%.

8. Произведен расчет мощности, потребляемой электродвигателями ШМ без энергообменных устройств и оснащенной двухзаходными винтовыми лопа¬стями - расхождение полученных значений с результатами промышленных ис¬пытаний не превышают 11,5 %. Произведен расчет нагрузок и их распределения

29

на конструкции цилиндрического классифицирующего устройства и лопастных эллипсных сегментов. В программной среде Unigraphicx NX по методу конеч¬ных элементов выполнен расчет их напряженно-деформированного состояния, доказана эксплуатационная надежность.

9. Разработаны рекомендации применения в мельницах различных типо¬

размеров патентно-защищенных конструкций и схем установки классифициру¬

ющих и энергообменных устройств, обеспечивающих необходимые условия для

реализации процессов классификации материала и МТ, изменяющихся при

вращении корпуса режимов движения МТ. Эффективные условия помола в ШМ

с классифицирующими и энергообменными устройствами обеспечиваются с

учетом стадийности использования мельницы в помольном комплексе, требова¬

ний технологического регламента на процесс помола, физико-механических

характеристик и способа измельчения материалов.

10. Разработан метод расчёта конструктивно-технологических параметров шаровых мельниц.

11. Основные результаты работы, представленные моделями, методиками, алгоритмами расчета, конструкциями внутримельничных устройств и схемами их установки прошли апробацию при проектировании промышленных шаровых мельниц. Эффективность работы мельниц подтверждена в условиях различных производств на Карачаево-Черкесском цементном заводе, ОАО «Завод силикат¬ных строительных материалов», ЗАО «Катавский цемент», ООО «АЛНА».

Экономический эффект от разработанных и внедренных научно-технических разработок составляет 7 млн. рублей.

Рекомендации. Результаты диссертационной работы рекомендуется ис-пользовать при модернизации действующих мельниц, для постановки и реше-ния новых задач по проектированию и модернизации мельниц с энергообмен-ными и классифицирующими устройствами.

Перспективы дальнейшей разработки темы состоят в развитии

предложенных в работе методологических основ для решения задач

совершенствования шаровых мельниц с учетом изменяющихся

технологических требований производств.

Перечень используемых сокращений: ЛЭУ – лопастные энергообмен-ные устройства, МТ – мелющие тела, ШМ – шаровая мельница.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ Во включенных ВАК РФ в Перечень рецензируемых научных изданиях

1. Ханин, С.И. Применение классифицирующего устройства в шаровой

мельнице / С.И. Ханин, В. С. Богданов, Д. Н. Солодовников // Строит. и дорож¬

ные машины. – 2015. - №8. – С. 7-10.

2. Ханин, С.И. Энергетический расчет мощности, необходимой для обес¬

печения движения мелющих тел в шаровой мельнице / С.И. Ханин,

Д.Н. Старченко, В.С. Богданов // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2015. – №4.

– С.79-83.

30

3. Ханин, С.И. Характеристики процесса движения мелющих тел в ци-линдрическом корпусе шаровой барабанной мельницы / С.И. Ханин // «Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова». – 2012. – №3. – С.91-94.

4. Ханин, С.И. Особенности распределения мелющих тел в конусообраз-ном корпусе шаровой барабанной мельницы / С.И. Ханин // Вестник БГТУ им.

B. Г. Шухова. – 2012. – №1. – С. 52-55.

5. Старченко, Д.Н. Особенности механизма поперечной сегрегации мелю¬щих тел в барабане трубной мельницы / Д.Н. Старченко, С. И. Ханин // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2010. – №3. – С. 83-88.

6. Ханин, С.И. Определение конструктивно-технологических параметров шаровой мельницы с внутримельничным энергообменным классифицирующим устройством / С.И. Ханин // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2010. – №3. – С. 69-73.

7. Ханин, С.И. Определение основных параметров процесса мокрого из-мельчения сырьевых материалов в трубной мельнице / С.И. Ханин, В.С. Богданов // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2010. – №1. – С. 87-90.

8. Ханин, С.И. Математическое описание процесса разрушения частиц материалов цементного производства / С.И. Ханин, В.П. Воронов, С.С. Трухачев // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2009. – №1. – С. 69–72.

9. Солодовников, Д.Н. Возможности повышения эффективности процесса

измельчения цементного клинкера в трубной мельнице / Д.Н. Солодовников,

С.И. Ханин, В.П. Воронов // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2009.– №1. –

C. 76–79.

10. Ханин, С.И. Определение критической скорости разрушения частиц материала в трубной шаровой мельнице / С.И. Ханин, В.П. Воронов, С.С. Трухачев // Изв. вузов. Стр -во. – 2009. – №2. – С. 123–128.

11. Ханин, С.И. Математическая модель процесса движения мелющих тел в трубной мельнице с винтовыми устройствами / С.И. Ханин // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2009. – №3. – С. 127–130.

12. Ханин, С.И. Особенности продольного движения мелющих тел в ци-линдрическом барабане мельницы / С.И. Ханин, В.С. Богданов, Д.Н. Старченко // Строит. и дорожные машины. – 2008. – №11. – С. 38–39.

13. Ханин, С.И. Модель движения мелющих тел в цилиндрическом бара¬бане трубной шаровой мельницы / С.И. Ханин, В.С. Богданов, Д.Н. Старченко // Строит. и дорожные машины. – 2008. – №10. – С. 46–47.

14. Ханин, С.И. Определение параметров соударений мелющих тел в трубной шаровой мельнице / С.И. Ханин, В.В. Ломакин, Д.Б. Орлов // Изв. ву-зов. Стр-во. – 2007. – №9. – С. 101–104.

15. Севостьянов В.С. Энергосберегающая техника и технология измель-чения мелкозернистых шихт / В.С. Севостьянов, С.И. Ханин, С.Л. Колесников, С.А. Долгий // Изв. вузов. Стр-во. – 1996. – №10. С. 120–124.

16. Севостьянов В.С. Энергосберегающие помольные агрегаты с винто-выми энергообменными устройствами / В.С. Севостьянов, Г.М. Редькин,

31

С.И. Ханин [и др.] // Строит. материалы. – 1995.– №3. – С. 30–31. В объектах интеллектуальной собственности

17. А. с. 1774560 SU. МКИ ВО2С 17/06. Шаровая мельница / Севостья-нов В.С., Богданов В.С., Ханин С.И., Гончаров А.А. (СССР). БТИСМ им. И. А. Гришманова. – №4900850/33; заявл. 09.01.91; зарегестр. 08.07.1992.

18. А. с. 1714838 SU. МКИ ВО2С 17/06. Трубная шаровая мельница / Се-востьянов В.С. Богданов В.С., Ханин С.И., Платонов В.С., Редько Ю.Г (СССР). БТИСМ им. И. А. Гришманова. – №4339467/33; заявл. 08.12.87; зарегестр. 22.10.1991.

19. А. с. 1651416 SU. МКИ ВО2С 17/06. Трубная мельница / Севостья-нов В.С., Богданов В.С., Ханин С.И., Зеленков С.Ф. (СССР). БТИСМ им. И.А. Гришманова. – №4762182/33; заявл. 28.11.89; зарегестр. 22.01.1991.

20. А. с. 1573606 SU. МКИ ВО2С 17/06. Трубная мельница / Севостьянов В.С., Богданов В.С., Ханин С.И., Платонов В.С., Редько Ю.Г., Шевченко И.Н., Козка В.П., Плотников В.И. (СССР). БТИСМ им. И. А. Гришманова. – №4499670/31-33; заявл. 28.10.88; зарегестр. 22.02.1990.

21. А.с. 1573608 SU.МКИ В02С 17/06. Внутримельничное энергообменное устройство / В.С. Севостьянов, В.С. Богданов, Ю.М. Фадин, Н.С. Богданов, С.И. Ханин (СССР). БТИСМ им. И.А. Гришманова. – №4610454/31-33; заявл. 30.11.91; зарегестр. 22.02.1999.

22. А. с. 1571844 SU. МКИ ВО2С 17/06. Шаровая мельница / Севостья-нов В.С., Богданов В.С., Воробъёв Н.Д., Шиманский В.Е., Ханин С.И. (СССР). БТИСМ им. И. А. Гришманова. – №4456323/31–33; заявл. 18.07.88; зарегестр. 15.02.1990.

23. Пат. 2279923 РФ, МПК ВО2С 17/06. Барабанная мельница / Ха-нин С.И., Богданов В.С., Ломакин В.В., Старченко Д.Н., Трухачёв С.С.; заяви¬тель и патентообладатель БГТУ им. В. Г. Шухова. -№2004137593/03; заявл. 22.12.04; опубл. 20.07.06, Бюл. №20. – 12 с.

24. Пат. 2236298 РФ, МПК ВО2С 17/06. Трубная мельница / Ханин С.И., Кайдаш В.В., Чалов А.А., Солодовников Д.Н., Ханина О.С.; заявитель и патен¬тообладатель Белгор. гос. технолог. акад. строит. материалов. – №2003113249/22; заявл. 05.05.03; опубл. 20.09.04, Бюл. №26.

25. Пат. 2168362 РФ, МПК ВО2С 17/04. Шаровая мельница / Севостья-нов В.С., Ханин С.И., Шаталов А.В., Гордеев М.В., Гендриксон М.В., Бы¬ков Ю.В., Темников А.А.; Белгор. гос. технолог. акад. строит. материалов. – №99116423/03; заявл. 28.07.991.; опубл. 10.06.2001, Бюл. №16.

26. Пат. 67891 РФ, МПК ВО2С 17/22. Футеровка / Ханин С.И., Богда¬нов В.С., Ломакин В.В., Воронов В.П., Друзев О.А.; заявитель и патенто-обладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. – №2007120428/22; заявл. 31.05.07; опубл. 10.11.07, Бюл. №31.

27. Пат. 62542 РФ, МПК ВО2С 17/06. Трубная мельница / Ханин С.И., Богданов В.С., Воронов В.П., Уппит С.С., Ханина О.С.; заявитель и патентооб-ладатель БГТУ им. В. Г. Шухова. – №2006116916/22; заявл. 16.05.06; опубл.

32

27.04.07, Бюл. №12.

28. Пат. 62343 РФ, МПК ВО2С 17/22. Футеровка / Ханин С.И.; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. – №2006116915/22; заявл. 16.05.06; опубл. 10.04.07, Бюл. №10.

29. Пат. 57147 РФ, МПК ВО2С 17/06. Трубная мельница / Ханин С.И., Богданов В.С., Ломакин В.В., Старченко Д.Н., Трухачёв С.С., Ханина О.С.; за-явитель и патентообладатель БГТУ им. В. Г. Шухова. – №20066100203/22; за-явл. 10.01.06; опубл. 11.10.06, Бюл. №28.

30. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012615855. Система расчёта и визуализации параметров движения мелющих тел в корпусе шаровой барабанной мельницы / Старченко Д.Н., Ханин С. И., Трухачев С.С.; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова; – №2012613407, заявлено 27.04.2012; зарегистрировано. 27.06.2012.

31. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012615268. Виртуальный стенд для проведения численных экспериментов по расчёту конструктивно-технологических параметров шаровых барабанных мельниц / Трухачев С.С.; Ломакин В.В., Ханин С.И., Старченко Д.Н.; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В. Г. Шухова; №2012612886, заявлено 16.04.2012; зарегистрировано. 9.06.2012.

В изданиях, индексируемых в международной базе Scopus

32. Bogdanov V. S., Hanin S. I., Starchenko D. N., Sagitov I. A. Distinctive

features of the relations between grinding equipment and devices inside ball mill body

/ ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2014. Vol. 9. No. 11. Pp. 2344-

2350.

33. Khanin S.I., Starchenko D. N., Bogdanov V. S., Mordovskaya O. S. Grind¬

ing Bodies Movement Features In A Ball Grinder Tapered Chamber // International

Journal of Applied Engineering Research (IJAER). 2015. Vol. 10, No 24. Pp. 45097-

45107.

В монографии

34. Ханин, С.И. Закономерности процесса движения мелющих тел в кор¬

пусе шаровой барабанной мельницы: монография / С.И. Ханин, Д.Н. Старченко.

– Белгород: Изд-во БГТУ, 2013. – 209 с.

В других изданиях

35. Ханин, С. И. Совершенствование процесса помола клинкера в шаро-вой мельнице [Электронный ресурс] / С.И. Ханин // Наукоёмкие технологии и инновации: Межднар. научно-практич. конф. Белгород: 2016. – Ч.4. – C. 244-248. Режим доступа: http://conf.bstu.ru/material\_conf/XXII\_nauchnue\_hteniya.

36. Ханин, С.И. Направления совершенствования шаровых мельниц / С.И. Ханин, С.С. Бирюков, О.С. Мордовская, А.В Вечканов // Энергосберегаю-щие технологические комплексы и оборудование для производства строитель-ных материалов: межвуз. сб. ст. / Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2015. – C. 351-354.

37. Ханин, С.И. Повышение эксплуатационных характеристик бронефу-

33

теровки трубных мельниц/ С.И. Ханин // Механики ХХI веку: V Всероссийская науч.-техн. конф. с междунар. участием: сб. докл. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ». – 2011. – С.25–27.

38. Ханин, С. И. Особенности движения мелющих тел в барабане шаро-вой мельницы / С.И. Ханин // Научные исследования, наносистемы и ресурсо-сберегающие технологии в стройиндустрии: сб. докл. Межднар. научно-практич. конф. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2010. – Ч. 3. – C. 266–271.

39. Ханин, С. И. Определение рациональных конструктивно-технологических параметров трубных мельниц / С.И. Ханин, С.С. Трухачев // Математические методы в технике и технологиях ММТТ-23: сб. тр. XXIII Меж-дунар. науч. конф. – Саратов: СГТУ.- 2010. – Т.11. – С. 43–44.

40. Ханин, С. И. Исследование продольной сегрегации мелющих тел в конусообразном барабане / С.И. Ханин, Д.Н. Старченко / ИНТЕРСТРОЙМЕХ – 2010: материалы Междунар. науч. конф. – Белгород: БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2010. – Т.2. – С. 168–174.

41. Ханин, С.И. Повышение эффективности процесса измельчения мер-геля в трубной мельнице / С.И. Ханин, Д.Н. Старченко – Там же. – С. 175-184.

42. Ханин, С.И. Трубная шаровая мельница с внутримельничным клас-сифицирующим устройством / С.И. Ханин, В.П Воронов, Д.Н. Солодовников // Механизация стр - тва. – 2009. – №1. – С. 9-13.

43. Ханин, С.И. Определение закономерностей движения мелющих тел в камере трубной мельницы с конусообразным профилем рабочей поверхности / С.И. Ханин, Д.Н. Старченко // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2008. – №1. – С. 59-62.

44. Ханин, С.И. Экспериментальное исследование движения мелющей загрузки в трубной шаровой мельнице / С.И. Ханин, В.В. Ломакин // Научные исследования, наносистемы и ресурсосберегающие технологии в стройинду-стрии: сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. / Белгород: БГТУ им. В. Г. Шу-хова. – 2007.–Ч.7 – С.198–202.

45. Ханин, С.И. Совершенствование конструкции бронефутеровки труб¬ной шаровой мельницы / С.И. Ханин, В.В. Ломакин, О. А. Друзев – Там же. – С. 203–206.

46. Ханин, С.И. Структурное представление имитационной модели труб¬ной шаровой мельницы на основе иерархии классов / С.И. Ханин, В.В. Ломакин, С.С. Трухачев // Машины и аппараты для производства строительных материа¬лов: материалы межвуз. сб. ст. БГТУ им. В. Г. Шухова: – Белгород, 2006. – Вып. VI – С. 150–156.

47. Ханин, С.И. Комбинированная конструкция бронефутеровки трубной шаровой мельницы / С. И. Ханин, Ломакин В.В., Друзев О.А., Селиверстов Н.С. – Там же. – С. 156-159.

48. Ханин, С.И. Применение систем UNIGRAPHICS NX2 и ANSYS WORKBENCH 9.0 при разработке классифицирующего устройства камеры гру¬бого помола мельницы Ø3×8м / С.И. Ханин, М.Ю. Ельцов, В.С. Молодых [и др.]

34

– Там же. – С. 159-164.

49. Ханин, С.И. Расчет корпуса трубной мельницы Ø3×8 м методом ко-нечных элементов в CAD/CAM/CAE – системе UNIGRAPHICS / С. И. Ханин, М.Ю. Ельцов, В.С. Молодых [и др.] – Там же. – С. 164–169.

50. Ханин, С.И. Применение контактной модели для исследования дви-жения мелющих тел в мельнице с винтовыми внутримельничными устройства-ми / С.И. Ханин, Д.Н. Старченко, С. К. Скоморохов // Механики ХХI веку: V межрегион. науч.-техн. конф. с междунар. участием: сб. докл. / Братск: ГОУ ВПО БрГУ. – 2006. – С.23–26.

51. Ханин, С.И. Применение контактной модели для исследования кине-матических и динамических параметров шаровой загрузки в коническом бара¬бане мельницы / С.И. Ханин, В.В. Ломакин, Д.Н. Старченко, М.Ю. Ельцов // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производ¬ства строительных материалов: материалы межвуз. сб. ст. / Белгород: БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2005. – Вып. V – С. 188–192.

52. Ханин, С.И. Моделирование процессов измельчения и классифика¬

ции в трубной шаровой мельнице на основе системы обслуживания потоков и

объектно ориентированного подхода / С.И. Ханин, В.В. Ломакин, С.С. Труха-

чёв, М.Г. Яворский – Там же. – С. 192–198.

53. Ханин, С. И. Применение контактной модели для исследования взаи-модействия мелющих тел в барабане мельницы / С.И. Ханин, Д.Н. Старченко, Д.Н. Солодовников // Труды Международного форума по проблемам науки, техники и образования / М: Академия наук о Земле. – 2004. – С. 148–149.

54. Ханин, С.И. Закономерности взаимодействия шаровой загрузки c внутримельничными устройствами / С.И. Ханин, Н.Д. Воробъёв, М.Ю. Ельцов, Д.Н. Старченко // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудо¬вание для производства строительных материалов: материалы межвуз. сб. ст. / Белгород: БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2004. – Вып. IV – С. 170–177.

55. Ханин, С.И. Повышение эффективности работы трубной шаровой мельницы / С.И. Ханин, В.В. Ломакин, Д.Н. Солодовников, С. С Трухачёв. – Там же. – С. 182–185.

56. Ханин, С.И. Геометрические и эксплуатационные параметры трубной мельницы с внутримельничными классифицирующими устройствами / С.И. Ханин, В.В. Ломакин, Д.Н. Солодовников, М.Г. Яворский – Там же. – С. 185–189.

57. Ханин, С.И. Структуризация подходов к построению математических моделей процесса измельчения материалов / С.И. Ханин, В.В. Ломакин, С. С Трухачёв – Там же. – С. 189–192.

58. Ханин, С.И. Повышение эффективности измельчения цементного клинкера в трубной шаровой мельнице / С.И. Ханин, В.В. Ломакин, Д.Н. Солодовников // Современные технологии в промышленности строитель¬ных материалов и стройиндустрии: материалы Международного конгресса. – Белгород: Вестник БГТУ. – 2003. – №6, ч. 3– С. 422–424.

35

59. Ханин, С.И. Особенности предизмельчения цементного клинкера в ТМ. / С.И. Ханин, Д.Н. Солодовников, В.В. Сабынин // Энергосберегающие технологии в дорожной и строительной технике: материалы межвуз. сб. ст. – Белгород: БГТАСМ. – 2002. – С. 182–185.

60. Ханин, С. И. Совершенствование конструкции внутримельничных энергообменных устройств / С. И. Ханин // Машины и комплексы для новых экологически чистых производств строительных материалов: сб. науч. тр. – Бел¬город: БТИСМ. – 1994. – С. 47–51.

Подписано в печать 28.12.2016 Формат 60×84/16

Усл. печ. л. 2 Тираж 150 экз. Заказ №

Отпечатано в Белгородском государственном технологическом университете им. В.Г. Шухова: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46