

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ И
ГОСУДАРСТВЕННОЕ КОСМИЧЕСКОЕ АГЕНСТВО УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ТЕХНИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ

На правах рукописи

ПРЯДКО НАТАЛЬЯ СЕРГЕЕВНА

УДК 622.7:622.73

**РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

Специальность 05.15.08 - обогащение полезных ископаемых

Диссертация на соискание научной степени
доктора технических наук

Днепропетровск - 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
РАЗДЕЛ 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ТЕОРИИ ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ И МЕТОДОВ ЕГО ИССЛЕДОВАНИЯ	16
1.1 Анализ основных закономерностей разрушения материалов.....	16
1.2 Закономерности измельчения смесей разнопрочных материалов.....	21
1.3 Исследование особенностей технологии тонкого измельчения.....	22
1.4 Анализ методов моделирования тонкого измельчения.....	29
1.5 Изучение эмиссионных эффектов при разрушении и измельчении...	32
1.6 Анализ возможностей акустического мониторинга измельчения.....	36
Обоснование цели и задач исследования.....	39
РАЗДЕЛ 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ С ПОЗИ- ЦИЙ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЗАТРАТ.....	42
2.1 Анализ энергетических особенностей тонкого измельчения.....	42
2.2 Обоснование критического уровня энергоемкости как основы управления процессом тонкого измельчения.....	45
2.3 Выявление целесообразности дискретного питания мельницы.....	54
2.4 Исследование кинетики измельчения фракций крупности в смеси...	59
2.5 Установление кинетических уравнений связи грансостава и дисперсности измельчения	64
2.5 Анализ кинетики измельчения классов крупности в различных технологиях измельчения.....	73
2.6 Разработка алгоритма управления удельной поверхностью продукта на основе функции распределения дисперсности	78
2.7 Описание дисперсности продуктов измельчения.....	90
Выводы.....	96
РАЗДЕЛ 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ	99
3.1 Анализ принципов моделирования измельчения.....	99
3.2 Разработка балансовых статических моделей измельчения руд.....	101

	3
3.3 Создание динамической модели замкнутого цикла измельчения.....	113
3.4 Моделирование процесса формирования гранулометрического состава.продуктов измельчения.....	119
3.5 Анализ закономерность роста удельной поверхности при измельчении.....	123
3.6 Разработка стохастической модели измельчения.....	130
Выводы.....	139
РАЗДЕЛ 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ НА БАЗЕ АКУСТОЭМИССИОННОГО МОНИТОРИНГА	
	141
4.1 Анализ возможности применения акустоэмиссионной информации для оценки показателей измельчения.....	141
4.2 Разработка акустоэмиссионной ячеечной модели измельчения.....	144
4.3 Создание аппаратной базы и методики акустического мониторинга струйного измельчения.....	152
4.4. Анализ акустических характеристик режимов работы мельниц различного типоразмера.....	158
4.5 Обоснование использования акустоэмиссионных параметров для оценки технологии струйного измельчения.....	167
4.6 Исследование связи дисперсности с акустическими характери- стиками сигналов зоны помола.....	171
4.7 Определение гранулометрического состава материала на основе акустической информации.....	176
4.8 Анализ акустического излучения различных зон мельницы.....	185
Выводы.....	188
РАЗДЕЛ 5 ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ АКУСТИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ.....	
	190
5.1 Создание база данных технологии и мониторинга измельчения.....	190
5.2 Разработка логистической модели процесса	192

	4
5.3 Нейросетевая идентификация процесса измельчения.....	205
5.4 Анализ акустоэмиссионной информации графическими методами...	208
5.5 Графическая идентификация оптимальных режимов измельчения...	212
5.6 Определение оптимальных режимов измельчения на основе анализа акустических сигналов.....	217
Выводы.....	227
РАЗДЕЛ 6 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ.....	228
6.1 Анализ результатов промышленного акустического мониторинга...	228
6.2 Исследование акустических характеристик промышленной струйной мельницы	231
6.3 Обоснование критериев оптимизации	233
6.4 Разработка способов акустической оптимизации измельчения и классификации	237
6.5 Повышение эффективности измельчения в результате акустической оптимизации процесса.....	240
6.6 Создание программных комплексов акустической оптимизации измельчения.....	248
6.7 Технико-экономическая оценка эффективности применения системы оптимизации работы струйной мельницы.....	251
Выводы.....	256
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	258
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	261
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	274
ПРИЛОЖЕНИЕ А – Результаты исследований гранулометрического состава продуктов измельчения.....	275
ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Программа имитационной модели замкнутого цикла тонкого измельчения.....	278
ПРИЛОЖЕНИЕ В – Программы моделирования процесса форми- рования гранулометрического состава продуктов измельчения.....	299

ПРИЛОЖЕНИЕ Д – Программный комплекс обработки данных акустического мониторинга струйного измельчения.....	305
ПРИЛОЖЕНИЕ Е – Программа оценки дисперсности продуктов по данным акустического мониторинга.....	314
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж – Методика анализа работы мельницы по сигналам акустического мониторинга.....	320
ПРИЛОЖЕНИЕ З – Акт о внедрении в учебный процесс результатов работы	330
ПРИЛОЖЕНИЕ К – Методики, акты промышленных испытаний и внедрения научно-технической разработки.....	331

Перечень условных обозначений, сокращений, индексов и символов

B_{λ} – дискретно-волновой критерий микроразрушения

R – содержание крупной фракции в исходном материале

t – время измельчения

$\varphi(x)$ – функция распределения частиц по крупности.

k_s – коэффициент поверхности

ρ – плотность материала

$E(x)$ – сепарационная характеристики классификатора

qV – удельная объемная производительность мельницы по исходному продукту

q_a^V – удельная производительность по вновь образованному классу

K_{opt} – акустический критерий оптимальности

$K_{эфф}$ – критерий эффективности процесса измельчения;

K_s – критерий эффективности диспергирования продукта;

$\mathcal{E}_{изм}$ – акустический показатель энергоемкости измельчения;

$\mathcal{E}_{дисп}$ – акустический показатель энергоемкости диспергирования;

$E_{уд}$ – удельная энергоемкость измельчения;

E_s – удельная энергоемкость диспергирования.

Перечень сокращений

АС – акустические сигналы;

АЭ – акустическая эмиссия;

ИСИ – информационная система измельчения;

ИТМ НАНУ и ГКАУ – Институт технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины;

ВГМК – Вольногорский горно-металлургический комбинат

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы.

Процессы измельчения используются для подготовки минерального сырья к переработке в горно-металлургической, химической промышленности, в порошковой металлургии, производстве строительных материалов, стекла, пластмасс, керамики, твердых топлив и других видов тонкодисперсных материалов. Продукты измельчаются, в основном, в энергоемких барабанных, струйных и планетарных мельницах. Затраты на измельчение значительные, а качество получаемых продуктов не всегда достигает необходимого уровня.

На обогатительных фабриках на измельчение руд тратится 45 – 65% общего расхода энергии. Особенно много энергии необходимо для тонкого измельчения. Так, в цементной промышленности при получении 1т цемента на измельчение сырья тратится 50 – 60 квт·ч, что составляет 50% общего количества энергии на его производство. Количество измельчаемых веществ во всем мире превышает 1 млрд. т в год. Около 4% мировых энергетических затрат приходится на операции измельчения различных технических продуктов. При тонком и сверхтонком измельчении затраты электроэнергии растут прямо пропорционально крупности продукта. Например, для получения в шаровой мельнице одной тонны материала крупностью менее 100 микрон требуется 25 кВт·ч, для получения этого же материала менее 50 микрон необходимо 50 киловатт, 25 микрон – 100 кВт·ч, 12 микрон – 200 кВт·ч, 1 микрон – 1400 кВт·ч.

Развитие промышленности требует производства продуктов тонкого (менее 20 мкм) и сверхтонкого (менее 7мкм) измельчения. Выполнение таких требований приводит к дальнейшему росту потребляемой энергии на единицу производимой продукции. Поэтому остается актуальным вопрос снижения энергопотребления при тонком измельчении полезных ископаемых и необходимости совершенствования оборудования и технологии из-

мельчения. Этот процесс сдерживается отсутствием теоретического обоснования выбора оптимальных режимов измельчения, методик и научных способов контроля дисперсности продукта, что не позволяет снизить энергоемкость процесса. Поэтому тема работы является *актуальной*.

Таким образом, *научная проблема*, решаемая в работе, состоит в установлении закономерностей и механизма формирования гранулометрического состава продуктов измельчения для достижения необходимой дисперсности при минимальном энергопотреблении.

Связь работы с научными программами, планами и темами. Работа выполнена в отделе термогазодинамики энергетических установок Института технической механики НАН Украины и ГКА Украины в соответствии с госбюджетными темами:

– «Исследование газодинамики технических систем по обеспечению их надежного функционирования» №г/р 0107U001320;

– «Исследования термогазодинамики процессов газоструйной транспортировки та обработки сыпучих материалов» №г/р 0109U000341;

– «Исследование термогазодинамических процессов высокоэнтальпийных управляемых газовых потоков для проблем создания новых и усовершенствованных ракетно-космических двигателей и энергетических установок» № г/р 0111 U000265 по которым автор был ответственным исполнителем разделов.

Цель работы – создание целостного представления процесса тонкого измельчения полезных ископаемых для разработки технологии и обоснования технологических и режимных параметров процесса, обеспечивающих снижение энергоемкости получения тонкодисперсных порошков.

Для достижения этой цели решаются следующие задачи:

1) установление энергетических особенностей тонкого измельчения и раскрытие механизма формирования гранулометрического состава материала при измельчении;

2) моделирование процесса тонкого измельчения для нахождения

оптимальных условий получения продукта необходимой крупности и дисперсности;

3) развитие теоретических основ процесса измельчения полезных ископаемых на основе акустоэмиссионного мониторинга и установление соответствия амплитудно-частотных характеристик акустических сигналов и технологических параметров измельчения;

4) разработка критериев эффективности, системы визуализации и идентификации режимов тонкого измельчения с использованием информационных технологий;

5) разработка рекомендаций относительно методов снижения энергопотребления струйных мельниц на основе использования результатов мониторинга эмиссионных эффектов разрушения.

Объект данного исследования – процессы тонкого измельчения с позиций анализа связи его энергоемкости с формированием гранулометрического состава продуктов.

Предмет исследования - связи технологических и эмиссионных параметров процесса измельчения.

Идея работы заключается в достижении необходимой дисперсности измельченных продуктов, характеризуемой контрольным классом крупности при минимально возможной удельной поверхности измельченного продукта путем мониторинга результатов измельчения и корректировки режимов измельчения.

Методы исследования: теоретический анализ – для исследования энергетических и кинетических особенностей тонкого измельчения; имитационное, балансовое, динамическое моделирование – для изучения закономерностей уменьшения крупности материала в замкнутом цикле; численные исследования – для анализа акустических сигналов и визуализации результатов акустического мониторинга процесса; экспериментальные исследования – для проверки теоретических положений и создания базы данных результатов тонкого измельчения материалов.

Научные положения, которые защищаются в диссертации:

1) интенсивность образования новой поверхности при тонком измельчении твердых полезных ископаемых прямо пропорциональна израсходованной энергии и снижается при достижении крупности измельченного продукта критической величины (15-25 мкм в зависимости от материала), обусловленной повышением прочности частиц;

2) кинетика измельчения фракции крупности твердых полезных ископаемых в смеси не зависит от наличия других фракций крупности, измельчающихся совместно;

3) производительность мельницы по готовому продукту в замкнутом цикле измельчения возрастает пропорционально содержанию в ней класса, крупнее контрольного;

4) величина вновь образованной удельной поверхности прямо пропорциональна количеству малоамплитудных (до десятка мВ) сигналов и обратно пропорциональна максимальным (порядка сотен мВ) значениям амплитуд акустических сигналов, возникающих при разрушении рудных частиц;

5) процесс тонкого измельчения полезных ископаемых характеризуется комплексом технолого-акустических критериев, которые связывают производительность, дисперсность, энергоемкость с амплитудно-частотными характеристиками сигналов зоны измельчения, позволяющих определить рациональные режимные параметры для достижения максимального технологического эффекта.

Научная новизна полученных результатов:

1) впервые сформулированы и обобщены для разных способов измельчения особенности формирования гранулометрического состава тонкодисперсного продукта и установлено изменение связи его дисперсности с энергозатратами на процесс, что стало базой контроля энергоемкости процесса; на основе установленной независимости кинетики измельчения фракций крупности в смеси и полученных оценок кинетики изменения грануломет-

рического состава продукта разработан метод прогнозирования образования узких фракций в процессе измельчения;

2) впервые разработаны имитационная, динамическая и стохастическая модели тонкого измельчения и ячеечная модель измельчения материала на основе результатов акустического мониторинга процесса, которые идентифицируют режимы измельчения и позволяют выбирать оптимальные;

3) впервые разработан новый метод оптимизации технологии струйного измельчения, который отличается использованием явления акустической эмиссии при разрушении твердых тел для мониторинга процесса измельчения; впервые получены теоретические и экспериментальные зависимости, которые характеризуют связь удельной поверхности, гранулометрического состава измельчаемого материала, производительности мельницы с акустическими параметрами процесса измельчения, что позволило разработать принципы оптимизации струйного измельчения;

4) впервые разработаны методы визуализации и идентификации процесса измельчения на основе использования информационных технологий для анализа акустоэмиссионных сигналов зоны измельчения и классификации, позволяющие контролировать режимы работы мельницы и выбирать оптимальную ее загрузку;

5) дальнейшее развитие получило исследование на основе балансового моделирования взаимосвязи удельной производительности мельницы с режимом классификации по крупности разгрузки мельницы, что позволило выделить критерии повышения эффективности измельчения и впервые установить характерный параметр мельницы для измельчаемой руды, который используется для расчета производительности замкнутых циклов.

Практическое значение работы:

1) разработана методика акустического мониторинга и создана база данных акустических параметров, позволяющие определить оптимальные

технологические параметры струйного измельчения для достижения заданной дисперсности продукта;

2) разработаны методики использования следующих информационных технологий при идентификации процесса струйного измельчения: нейросетевой анализ режимов измельчения, Вейвлет и энергетический анализ акустических сигналов зоны измельчения, анализ поверхности функции плотности распределения вероятности значений амплитуд сигналов зоны измельчения и классификации, моделирование на основе цепей Маркова. Это позволило на базе ограниченного количества исходных данных выполнить выбор оптимальных параметров процесса измельчения для получения заданной дисперсности продуктов;

3) разработаны бесконтактные способы контроля процесса и качества продукта тонкого измельчения, которые защищены патентами Украины на изобретение, повышающие существенным образом производительность мельницы, точность оценок и сокращающие время исследований;

4) разработана методика проведения акустического мониторинга работы струйной мельницы, порядок проведения акустических измерений, результаты использования которых изложены и утверждены в акте промышленного апробирования акустического мониторинга струйной измельчительной установки в условиях ВГМК;

5) разработана система оптимизации работы промышленной мельницы, получены количественные показатели акустической и технологической энергоемкости измельчения и диспергирования циркона в разных режимах работы промышленной мельницы ВГМК, что повысило производительность мельницы на 50% и определило расчетный годовой экономический эффект 185-507 тыс. грн. в зависимости от контрольной крупности цирконового концентрата (акт внедрения).

5) создана база данных, методики анализа результаты акустического мониторинга, которые используются в учебном процессе студентов специ-

альностей «Обогащение полезных ископаемых» «Информационные управляющие системы и технологии», ГВУЗ «Национальный горный университет».

Личный вклад автора состоит в обосновании научной проблемы, постановке цели и задач исследования, формулировки новизны и научных положений, разработке и создании математических моделей процесса измельчения, анализа замкнутых циклов тонкого измельчения, в разработке схемы и методики акустического мониторинга процесса измельчения, в планировании, организации, проведении экспериментальных исследований и обработке их результатов. Обоснование и внедрение в промышленность теоретических разработок и акустического мониторинга процесса тонкого измельчения проведено с участием автора и его изобретений.

В статьях, опубликованных автором, отражен его личный вклад в разработку научных результатов. Экспериментальные исследования, которые вошли в диссертационную работу, выполнены непосредственно соискателем при участии сотрудников отдела термогазодинамики энергетических установок ИТМ НАНУ и ДКАУ, кафедры обогащения полезных ископаемых ГВУЗ «Национальный горный университет». Результаты опубликованы в соавторстве с ними.

Апробация результатов диссертации.

Основные результаты работы докладывались на: VI - IX конгрессах обогатителей стран СНГ 2007 – 2013 гг. (г. Москва), Форумах горняков 2006 – 2012 гг. (г. Днепропетровск), Международной научно-практической конференции «Вібрації в техніці та технологіях», 2007 г. (Львов), 2009 г. (Винница), 2012 г. (Полтава), Международных XIV- XX научно-технических конференциях «Теория и практика процессов измельчения, разделения, смешения и уплотнения материалов», 2006-2014гг. (Одесса), Научно-технической конференции «Применение дисперсных и ультрадисперсных порошковых систем в промышленных технологиях» 2008 г. (Санкт-Петербург), Научно-технических конференциях «Информационные

технологии в металлургии и машиностроении (ИТММ) 2010-2015г.г. (Днепропетровск), Международной научно-практической конференции «Сталий розвиток гірничо-металургійної промисловості: досягнення, проблеми та перспективи розвитку» 2008 – 2011 гг. (Кривий Ріг), Международной проблемно - научной межотраслевой конференции «Інформаційні проблеми компютерних систем, енергетики, економіки, моделювання та управління (ПНМК-2011), 2011г. (Бучач), III международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы прикладной механики и прочности конструкций» 2011г. (Ялта), XIV Международной научной конференции «Новые технологии и достижения в металлургии и инженерии материалов и процессов», 2013г. (Ченстохова, Польша), 22-nd MINE PLANNING & EQUIPMENT SELECTION (MPES) Conference, 2013г. (Dresden, Germany,).

Материалы диссертации рассматривались на Ученом Совете ИТМ НАН и ГКА Украины в 2011, 2014 и 2015гг., на заседании кафедры обогащения полезных ископаемых ГВУЗ «Национальный горный университет» в 2014 – 2015г.г.

Публикации. Всего по результатам исследований опубликовано 104 работы в научно-технических журналах, из них 87 статей в научно-технических журналах, которые входят в соответствующий перечень ВАК, и получено 8 патентов Украины на изобретение. Основные результаты исследований отражены в 49 – ти научных работах, в том числе: в 38-и статьях в научно-технических журналах, которые входят в соответствующий перечень ВАК (из них 12– в изданиях, зарегистрированных в наукометрических базах: Scopus, Index Copernicus, “Ulrich’s Periodicals Directory”, ВИНТИ РАН, IEE Inspec и зарубежных изданиях), в 3 патентах Украины на изобретение и 9 докладах на международных конференциях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 разделов, выводов, списка использованной литературы из 130 наименований на 13 страницах, содержит 274 страницы текста, в том числе

111 рисунков, 26 таблиц, а также 8 приложений. Приложения на 145 стр. включают: результаты теоретических и экспериментальных исследований в виде таблиц, программ расчетов технологических и акустических параметров процесса измельчения; результаты анализа гранулометрического состава измельченных материалов; методики проведенных промышленных испытаний и акты использования результатов исследований.

Автор считает своим долгом выразить глубокую признательность научному консультанту д.т.н., профессору Пилову П.И., сотрудникам ГВУЗ «Национальный горный университет» д.т.н. Горобец Л.Ж., д.т.н. Младецкому И.К., Института технической механики НАНУ и ГКАУ д.т.н. Коваленко Н.Д., д.т.н. Стрельникову Г.А. за внимание и помощь в подготовке работы, ведущим инженерам Грушко В.А., Гупало М.Т., Пясецкому Н.Ю., Ризуну В.П. за помощь в проведении экспериментальных работ.

1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ТЕОРИИ ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ И МЕТОДОВ ЕГО ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Анализ основных закономерностей разрушения материалов

Процесс разрушения материалов (образцов) при нагружении рассматривался на основе кинетической теории прочности, согласно которой прочность твердых тел зависит от температуры и времени действия силы. Энергетический барьер разрушения был близок энергии связи атомов в кристаллах. При измельчении время действия нагрузок очень мало, и при обычной температуре для объяснения временной прочности использовали представления Гриффитса [7] о зародышевых трещинах. Условие Гриффитса объясняет снижение прочности кристаллов «опасными» дефектами, а источником их возникновения являлось пластическое деформирование. Теория зарождения трещин в кристаллах в результате сдвига основывалась на дислокационной модели [8]. Если вводилось представление о подвижных структурных дефектах атомного размера, характер движения и распределения были такие же, как в дислокационной модели, тогда основные положения теории дислокации применялись и к хрупким аморфным телам. Это позволяло рассматривать физику разрушения материалов с этих позиций, т.к. в измельченных материалах ранее было доказано существование многочисленных атомных дефектов в поверхностных слоях. Однако размеры тонко измельченных частиц иногда оказывались в десятки-сотни раз меньше «опасных» трещин, поэтому модель Гриффитса была дополнена учетом конечных размеров тел, т.е. величина трещины была заменена размером области локализации сдвига. Таким образом, трещины образуются при определенном уровне возникающих перенапряжений и числе одновременно возникающих сдвигов. Тогда в предельно напряженном образце образуется не одна, а множество трещин.

Процесс измельчения рассматривается в физике разрушений, как

разрушение твердых тел последовательной серией механических воздействий [7]. Задачей теории измельчения является установление взаимосвязи между дисперсностью порошка, физико-химическими и механическими свойствами частиц, затратами энергии и параметрами мельницы. Все эти сведения необходимы для улучшения конструкций мельниц и оптимизации самого процесса измельчения. Конечная цель исследований в области тонкого измельчения – предсказание результата диспергирования материалов различных свойств, т. е. образования тонкодисперсных частиц с высокой удельной поверхностью при минимальном количестве пробных актов измельчения.

В конце прошлого века взгляды на физику разрушения изменились под влиянием новых важных открытий.

Прежде всего, кинетическая концепция прочности твердых тел, предложенная С. И. Журковым, показала, что разрушение – это термодинамический процесс, и позволила обосновать возможность предсказывать разрушение на микро и макро уровне. Ранее разрушение образца при одноосном растяжении можно было предсказать с логарифмической точностью по уравнению, описывающему долговечность:

$$\tau = \tau_0 \exp (U_0 - \gamma \sigma / k T) \quad (1.1)$$

где σ – механическое напряжение, T – температура образца, U_0 – энергия активации процесса разрушения, τ_0 – период межатомных колебаний, k – коэффициент Больцмана, γ – параметр, связанный со свойствами материала.

Однако благодаря экспериментальному изучению кинетики накопления и развития субмикроскопических трещин [8] исследование кинетики процесса разрушения на атомном и микроскопическом уровне продвинулось вперед. Методом малоуглового рентгеновского рассеяния можно было вычислить размеры трещин и их концентрацию. Позже в работах Куксенко В.С, Слущера А.И. и Тамужа В.П. [9] было установлено, что размеры начальных микротрещин обусловлены структурой материала, которая

как формирует локальные перенапряжения, так и ограничивает их рост на границах гетерогенности. На основе дальнейших исследований были сделаны два важных вывода о скорости накопления трещин и характере предразрывной концентрации микротрещин. Показано, что кинетика накопления микротрещин определяет долговечность нагруженного образца, и уравнение скорости накопления микротрещин (\dot{C}) имеет сходный с (1.1) вид:

$$\dot{C} = \dot{C}_0 \exp(U_0 - \gamma\sigma / k T) \quad (1.2)$$

Особую роль в разрушении материалов играет предразрывная концентрация микротрещин, которая не зависит от режима нагружения, а зависит только от размеров образующихся микротрещин. Эта концентрация может принимать большие значения при переходе от разрушений на микроуровне к разрушениям на макроуровне.

В результате статистических обобщений в отделе физики прочности ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН была предложена и развита двухстадийная модель разрушения гетерогенных материалов, базирующаяся на кинетической модели прочности [10]. Главная гипотеза модели состояла в том, что дефекты (трещины) накапливаются на первой стадии и затем ускоренно развиваются на второй заключительной стадии. Модель была основана на физически обоснованных критериях прогнозирования разрушения, апробированных на различных объектах с использованием акустической и сейсмической эмиссии [11]. На первой стадии происходит накопление одиночных стабильных микротрещин во всем объеме тела, что из-за флуктуации концентрации трещин приводит к образованию комплексов кластеров близко расположенных трещин, способных к взаимодействию, слиянию и формированию очага разрушения. На второй стадии происходит локализованное развитие очага разрушения, в результате чего появляется магистральная трещина, и образец разрушается.

Помимо модели разрушения авторами [9] был выведен концентрационный критерий $k = r_i/L$, где L – размер образующихся трещин, r_i – среднее рас-

стояние между трещинами. Этот критерий определяет переход от одной стадии ко второй. Определено, что активное образование начинается при $k \approx 3$.

На более глубокое понимание физики разрушения повлиял также концентрационный критерий Бовенко В.Н. [12]. Согласно модели деформируемого твердого тела по В. Бовенко предразрушающее состояние включает три стадии: стационарную – квазипериодические релаксационные (разрывные) колебания, ускоренную – стохастические автоколебания и третью неустойчивую – авторезонансные колебания.

Причем, соотношения между длительностями стадий выглядят как $t_I : t_{II} : t_{III} = 1 : 10^{-3} : (10^{-12} - 10^{-6})$, то есть продолжительность t_I стационарной стадии, характеризующей ресурс долговечности материала при статических испытаниях, примерно на три порядка превышает общую продолжительность двух других стадий (t_{II} и t_{III}) [13]. Указанные стадии протекают неоднократно и каждый раз все физико-механические свойства контролируются дискретно-волновым критерием микроразрушения B_λ .

Теоретические оценки показали, что значение B_λ для большинства твердых тел находится в сравнительно узком интервале от 2,1 до 3,1, так что его среднее значение равно $B_\lambda \cong 2,6$. Если $B_\lambda > 2,1 \dots 3,1$, нагруженное тело находится в устойчивом состоянии, а при $B_\lambda \leq 2,1 \dots 3,1$ релаксационные автоколебания атомов приводят нагруженную систему к разрушению. При этом характерные размеры образующихся фрагментов кратны величине инвариантности микроразрушения твердых тел B_λ .

Действием критерия B_λ объясняется наличие максимумов в распределениях частиц по размерам. Установлено, что гранулометрические характеристики продуктов измельчения в диапазоне размеров частиц от 10^{-5} – 10^{-1} м подчиняются геометрической прогрессии для ряда преимущественных размеров частиц d_k / d_{k-1} , и знаменателем прогрессии служит величина дискретно-волнового критерия микроразрушения, т. е. практически d_k / d_{k-1} кратны величине $B_\lambda = \lambda_B / \langle a \rangle = 2,6 \pm 0,5$. Из этого следует, что фрактальная размерность диспергированного продукта связана с дискретно-

волновым критерием разрушения в согласии с автоколебательной концепцией предразрушения.

Главный вывод состоит в том, что распределение по размерам элементов атомно-молекулярной структуры является полимодальным, то есть в объеме материала сосуществуют несколько уровней, образующих иерархию атомно-молекулярной самоорганизации конденсированного вещества. Анализ экспериментальных данных, полученных в работах [12-13], показал, что полимодальность в распределении частиц удается проследить как при разрушении, так и при образовании конденсированной фазы в широком диапазоне масштабов ($10^{-10} \dots 10^5$ м). При этом отношение последовательно расположенных преимущественных размеров на экспериментальной гистограмме также совпадает с величиной дискретно-волнового критерия микроразрушения твердых тел, что позволяет говорить об общей закономерности устройства объектов материального мира. Таким образом, новый методологический подход к рассмотрению связи диспергирования с микроразрушением, основанный на учете единства дискретных и волновых свойств вещества в конденсированном состоянии, подтверждает определяющую роль дискретно-волнового критерия в возникновении эффектов диспергирования.

Из полученных результатов следует вывод о целесообразности применения дискретно-волнового критерия в качестве модуля классификации при сопоставлении гранулометрических характеристик тонкодисперсных материалов. Физический критерий микроразрушения B_λ составляет основу оценки следующих технологических показателей диспергирования: соотношения размеров преимущественных фракций гранулометрических характеристик и удельной поверхности измельченного продукта, степени измельчения, удельного расхода энергии на измельчение. Это надо учитывать при разработке теории тонкого измельчения.

1.2 Закономерности измельчения смесей разнопрочных материалов

Полезные ископаемые, перерабатываемые горно-обогатительной и металлургической промышленностью, представляют собой многокомпонентные системы различных по прочности и измельчаемости минералов.

Первыми исследованиями, посвященными проблеме сухого (Холмса и Патчинга) и мокрого (Д.В. Фюрстенау) измельчения смесей разных минералов, установлено, что измельчение кварца и известняка в смеси дает продукты, характеристики крупности которых до некоторой степени подобны характеристикам крупности, полученным при отдельной измельчении каждого минерала. Впоследствии изучением поведения смесей разных минералов в шаровых мельницах занимался ряд ученых (Т. Танака, Д. Келсалл, П. Халасьямани, П. Сомасундаран, А. Мюлар и др.). При этом методом оценки параметров характеристик крупности измельченных продуктов показано, что каждый минерал искусственной смеси измельчается независимо от присутствия другого и характеристика крупности каждого компонента соответствует уравнению Годэна-Андреева-Шумана независимо от измельчения компонента отдельно или в смеси. Однако по характеристикам крупности конечного продукта нельзя проследить течение процесса измельчения

Своими исследованиями Л.Ф. Биленко [5, 29] доказал положение о независимом измельчении разнопрочных компонентов в смеси. Причем установлено, что характеристика крупности компонента, измельченного в смеси с другим компонентом, остается такой же, как и при отдельном измельчении его до той же крупности. При измельчении смеси разнопрочных материалов коэффициент опережающего измельчения, показывающий степень предварительного помола твердого компонента в схеме измельчения двухкомпонентных смесей, не зависит от количества твердой составляющей в смеси, а определяется только свойствами измельчаемых материалов. Относительное возрастание затрат электроэнергии при снижении

конечной крупности измельчения компонентов смеси оказалось одинаковым как для лабораторных, так и для промышленной мельницы при измельчении данного материала одинаковой исходной крупности. Это очень важно для моделирования процесса измельчения. Определив кинетику измельчения исследуемой руды в лабораторной мельнице и введя поправку на крупность руды, загружаемой в промышленную мельницу, можно определить кинетику для промышленной мельницы и относительные затраты энергии при помоле до различной крупности в промышленных условиях.

При тонком измельчении полезных ископаемых разные по крупности фракции материала ведут себя по-разному. В связи с этим, материал, подаваемый на измельчение, можно рассматривать как смесь разнопрочных материалов. На первом этапе относительно крупный материал измельчается легче и требует меньше энергии. Но при измельчении частиц меньшего размера, т.е. при увеличении суммарной поверхности мелкодисперсной фазы требуется больше энергии для измельчения частиц, наблюдается термодинамическое неравновесие двухфазной системы, и сильнее проявляются силы коагуляции. Необходимо изучить особенности тонкого измельчения минералов с позиций поведения частиц разной крупности в процессе измельчения.

1.3 Исследование особенностей технологии тонкого измельчения

Измельчение – это комплексный процесс, не заканчивающийся только изменением размеров частиц материала. Особенно это относится к тонкому измельчению минерального сырья. Тонкое измельчение – это сложный физико-химический процесс увеличения потенциальной энергии вещества, поверхностной энергии, энергии внутреннего строения и, как следствие, повышение химической активности [14]. В ходе диспергирования материала увеличивается удельная поверхность частиц, удельная поверхность контакта взаимодействующих фаз, что повышает механоактива-

цию измельченного продукта, определяет скорость протекания последующих тепло- и массообменных процессов, изменение свойств материалов.

Проблемы измельчения, его теоретические аспекты рассмотрены в работах С.Е. Андреева, В.В. Товарова, В.А. Перова, Г.С. Ходакова, В.И. Ревнивцева, П.Ю. Бутягина, Л.Ф. Биленко, Л.А. Вайсберга, С.Ф. Шинкаренко, В.И. Кармазина, Е.Е. Серго, П.И. Пилова, В.П. Франчука, А.Н. Марюты, Л.Ж. Горобец и др. Для анализа процесса дробления-измельчения предложены гипотезы Риттингера, Кирпичева-Кика, Бонда, Ребиндера, Рундквиста, основанные на различных связях параметров измельчения и энергоемкости процесса [19-23].

Комплексные теоретические и практические исследования процессов измельчения, которые реализованы в современных высокоэнергонапряженных мельницах, показали, что непосредственно на процесс диспергирования расходуется лишь незначительная часть энергии, подводимой к обрабатываемому материалу. Большая ее часть превращается в теплоту, а меньшая усваивается, накапливается материалом и используется в виде различных дефектов структуры и дальнейшего разрушения [18]. Эта энергия идет на увеличение поверхностной энергии и является полезной работой измельчителя.

Дисперсность получаемого продукта в значительной мере определяет качество полученных продуктов и влияет на повышение их технологических и потребительских свойств. В зависимости от задач измельчения требуемая дисперсность определялась либо гранулометрическим составом, остатками на контрольных ситах, либо вновь образованной удельной поверхностью.

Исследователи считают основной задачей при изучении процесса измельчения – установление связи между затраченной энергией и достигнутой дисперсностью материала. Это реализовывалось различными путями:

- сопоставлением результатов усредняющих испытаний исследуемого процесса результатам опытного измельчения материала в некоторых

стандартных условиях;

- получением математических соотношений, связывающих технологические параметры [20-23];

- моделированием процессов, происходящих в технологических аппаратах измельчения, на основе решения уравнений баланса массы фракций материала, стохастического подхода и решения уравнения Колмогорова-Чепмена, описания процессов матричными моделями [23 – 25].

При разделении минеральных частиц по крупности, применяемом при обогащении полезных ископаемых, обычно исходный продукт разделяется на два класса, т.е. происходит контроль гранулометрического состава измельчаемого материала не во всем спектре размеров частиц, а по одному контрольному размеру x_c , характерному для данного процесса или устройства [18]. При таком моделировании, когда измельчаемый материал представляется в виде бинарной смеси крупной и мелкой фракции, процесс описывают кинетическим уравнением вида

$$\frac{dR}{dt} = -pR, \quad (1.3)$$

которое имеет решение $R = R_0 \exp(-pt)$, где R_0 , R – содержание крупной фракции в исходном материале и в момент измельчения t , p – постоянная скорости измельчения, t – время измельчения. Однако при экспериментальном определении времени непрерывного процесса измельчения возникает неопределенность, которая приводит к неопределенности восстановления величины p , в результате чего может быть неточный результат прогноза измельчения. При введении дополнительных уточняющих множителей теряется физический смысл решения и трудно оценить влияние технологических параметров на кинетику измельчения [19].

Товаров предложил усовершенствованный вид уравнения кинетики измельчения (1.4), которое неплохо описывает опытные кривые для различной продолжительности измельчения.

$$R = R_0 e^{-kt^m}, \quad (1.4)$$

Однако, определяя скорость измельчения $\frac{dR}{dt}$ исследователи приходят к неопределенности вычисления граничных условий, т. к. скорость измельчения становится бесконечной в начале или конце измельчения в зависимости от значения параметра m .

Многие исследования направлены на выявление связи энергии, потребляемой измельчительным аппаратом, и степени сокращения крупности. При этом, сокращение крупности понималось как функция объема, диаметра образованных частиц или площади вновь образованной поверхности. Было установлено, что малые изменения крупности частиц были пропорциональны энергии, затраченной на единицу их массы, а энергия, необходимая для достижения одинаковых относительных изменений крупности обратно пропорциональна некой функции начальной крупности частиц. Таким образом, соотношение между энергией и разрушением может быть выражено в виде [17]:

$$dE = -Kdx / x^n \quad (1.5)$$

К этому выводу сводятся известные гипотезы различных ученых по поводу энергетической оценки процессов измельчения и дробления:

$$E = 2K(1/x_2 - 1/x_1); \quad (1.6)$$

$$E = K \ln(x_1 / x_2); \quad (1.7)$$

$$E = 2K(1/\sqrt{x_2} - 1/\sqrt{x_1}). \quad (1.8)$$

Риттингер [20] предполагал, что расход энергии на дробление пропорционален величине вновь образованной поверхности (1.6). Согласно гипотезе Кирпичева – Кика [21] энергия, необходимая для дробления и измельчения материала, пропорциональна его весу или объему (1.7). Обе эти гипотезы математически выражаются из (1.5) при $n = 1,0$ и $n = 2,0$, соответственно. При $n = 1,5$ получаем математическое выражение гипотезы Бонда [22], являющейся промежуточной между первыми двумя (1.8).

Все эти соотношения проверены на практике и имеют свои области применения, а также условия, при которых они не действуют. Так, гипотеза Риттингера хорошо согласуется с практикой при тонком измельчении, гипотеза Кирпичева - Кика – при крупном дроблении. Гипотеза Ребиндера связывает процесс разрушения с физико-механическими свойствами пород и минералов, охватывает любой случай разрушения и при определенных значениях крупности сводится к двум первым гипотезам: $A = \sigma \Delta S + K \Delta V$, где A – работа, затрачиваемая на разрушение, σ – избыток свободной энергии в пограничном слое, ΔS – поверхность, образованная при разрушении, ΔV – часть объема, подвергшаяся деформации, K – работа упругой и пластической деформации, приходящаяся на единицу объема.

Общая форма соотношения между энергией и сокращением крупности дана Хукки [23]:

$$dE = -Kdx / x^{f(x)}. \quad (1.9)$$

Этот американский ученый показал, что энергия, необходимая для одинакового сокращения крупности частиц, увеличивается с уменьшением их крупности. Однако энергия, расходуемая непосредственно на процесс разрушения, весьма мала по сравнению с потребляемой энергией (3% - 0,5%). Для более корректного описания этого процесса необходимо как можно более точно определить соотношение между исходным продуктом и продуктом измельчения. Кроме того, определены зоны действия выведенных законов измельчения (см. рис. 1.1: кривые 1, 3, 4 – законы Риттингера, Бонда, Кирпичева – Кика, 5, 6 - диапазоны измельчения дроблением) и есть плохо изученный диапазон крупности частиц (диапазон 2 на рис. 1.1 – диапазон тонкого измельчения) [23].

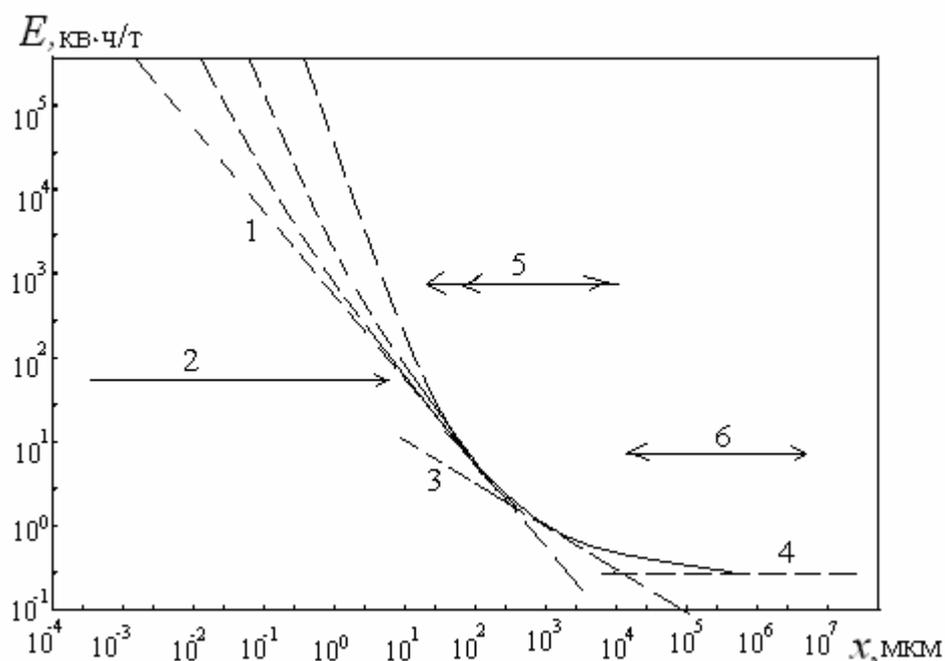


Рисунок 1.1 – Области действия «энерго-крупностных» законов

Таким образом, вопрос о развитии теории тонкого измельчения, причинах значительного увеличения энергоемкости еще недостаточно изучен. Тонкое измельчение более подробно рассмотрено применительно к цементной промышленности. В этом случае дисперсность полученного продукта оценивалась по образованной удельной поверхности, в отличие от горнорудной промышленности, где преследуется цель получения продукта определенного гранулометрического состава и избегается образования переизмельченных частиц, отрицательно влияющих на последующие операции обработки руд [19, 25]. Измельчение, в целом, связано с образованием новых поверхностей, что ведет к увеличению суммарной и удельной поверхности материала.

Исследования многих авторов [1, 5, 14, 19, 25] показали, что изменение содержания крупного класса в зависимости от продолжительности измельчения при размоле в барабанных мельницах периодического действия может быть выражено основным уравнением кинетики размола (1.5) – (1.8) для различных материалов, при различных технологических условиях и широких интервалах крупности продукта. Однако были отмечены некото-

рые отклонения полученных результатов от установленной зависимости. Этот факт показывает, что процесс размол в этих случаях протекает сложнее, чем по предложенной формуле. Необходимо выяснить причины, вызвавшие эти отклонения и уточнить уравнение кинетики измельчения для условий тонкого и сверхтонкого измельчения.

С целью снижения расхода электроэнергии и повышения производительности мельниц все шире используется измельчение в замкнутом цикле. В этих условиях из мельниц удаляется заведомо недоизмельченный продукт, который после классификации вновь возвращается в мельницу на измельчение. Это подход позволяет избежать переизмельчения продукта и снизить энергоемкость процесса.

В помольной камере лишь небольшая часть затрачиваемой энергии расходуется непосредственно на помол. Значительное количество энергии теряется на износ, нагрев измельчающей среды. При усовершенствовании технологического процесса стремятся сократить долю непроизводительной энергии. На расход энергии влияют следующие факторы:

- технологические схемы и компоновка измельчительной установки;
- конструкция измельчительной установки;
- свойства исходного материала;
- требования к готовому продукту;
- режимы эксплуатации помольной установки.

Эти факторы следует рассмотреть с целью разработки оптимальных условий тонкого измельчения при получении необходимого качества готового продукта.

Измельчительные установки не могут работать при оптимальной производительности и оптимальной расходе энергии, т. к. в реальных промышленных условиях выполнить эти два условия очень сложно. Для этого необходимо разработать систему постоянного мониторинга режима и его управления в текущем времени измельчения.

1.4 Анализ методов моделирования тонкого измельчения

Несмотря на известные успехи в развитии теории и практики диспергирования и механоактивации сыпучих материалов, теоретические основы этих процессов разработаны явно недостаточно. Анализ исследований, проведенных в последние годы, показывает, что фундаментом для создания теоретических основ процессов диспергирования и механоактивации являются преимущественно детерминистические представления механики гетерогенных сред и феноменологической термодинамики необратимых процессов.

В развитие детерминистической теории процессов диспергирования и механоактивации особенно большой вклад внесли научные школы В.В. Кафарова и И.Н. Дорохова [37], В.Н. Блиничева [38-39], В.Е. Мизонова [40] и др. Особо следует выделить большую роль в развитии теории диспергирования научной школы, основанной В.В. Кафаровым [37, 41]. Им, совместно с И.Н. Дороховым и др. впервые была развита методология системного анализа процессов диспергирования, сформулированы общие подходы к формализации и математическому описанию этих процессов. Анализируя нынешнее состояние проблем теории диспергирования и механоактивации, необходимо отметить, что главное место среди методов конструирования моделей кинетики диспергирования все еще продолжают занимать балансовые методы. Это связано с тем, что модели создаваемые на базе механики гетерогенных сред сложны и неудобны в обращении.

В настоящее время для правильного подбора оборудования горно-обогатительных комбинатов и эффективного его использования широко используются различные пакеты компьютерных программ для расчета схем обогащения. С помощью моделирования можно рассмотреть множество возможных схем рудоподготовки, спрогнозировать показатели схем при изменении параметров работы оборудования с целью достижения нужной крупности продукта.

Моделирование схем рудоподготовки в основном базируется на двух методах: имитационном (стационарном) и динамическом моделировании. Имитационное моделирование основывается на логико-математическом описании объекта, позволяет анализировать и оценивать его работу, строить модели, которые достаточно точно описывают реальную схему.

Наиболее известные пакеты по моделированию схем дробления и измельчения рассмотрены в [42]. Одни из них – PlantDesigner и BRUNO, разработанные соответственно Sandvik и Metso Minerals, обладают встроенными базами данных по оборудованию, сырью и не требуют дополнительных параметров и характеристик. Однако эти пакеты не предусматривают расчет схем измельчения и адаптированы к оборудованию своих фирм. Другие программные продукты - JKSimMet и USIM PAC, составлены из универсальных модулей, основанных на известных принципах работы основного рудоподготовительного оборудования и требующих огромного объема исходных данных. Для точного моделирования конкретной схемы требуется ввод всех необходимых сведений, и корректность модели зависит от точности данных.

На основе динамического моделирования описывается изменение состояния объекта, и разработанные пакеты используются для создания систем автоматического управления. Под динамической системой понимают объект или процесс, для которого однозначно определено понятие состояния как совокупности некоторых величин в данный момент времени, и задан закон (эволюция), который описывает изменение начального состояния с течением времени и позволяет по начальному состоянию прогнозировать будущее состояние динамической системы [43]. Математическая модель динамической системы считается заданной, если введены параметры (координаты) системы, определяющие однозначно ее состояние, и указан закон эволюции состояния во времени. В зависимости от степени приближения одной и той же системе могут быть поставлены в соответствие различные математические модели. Исследование реальных систем идет

по пути изучения соответствующих математических моделей, совершенствование и развитие которых определяется анализом экспериментальных и теоретических результатов при их сопоставлении.

Учитывая статистическую природу гетерогенных систем, а также вероятностный характер процессов нагружения частиц дисперсной фазы в измельчительных установках, следует дополнить детерминистическую теорию стохастической. Фундамент стохастической теории процессов диспергирования заложен в работах ученых Е.А. Непомнящего [44-45], А.А. Александровского, и Ф.Г. Ахмадиева [46], А.И. Зайцева и Д.О. Бытева [47] и др. Применение методов стохастических Марковских процессов и неравновесной статистической механики позволяет разрабатывать модели кинетики диспергирования, адекватно описывающие физику процессов в аппаратах с различными способами подвода энергии к обрабатываемым системам.

Дальнейшее развитие теоретических основ процессов диспергирования и механоактивации гетерогенных систем связано с бурным развитием компьютерных технологий, которые открывают новые возможности для создания автоматизированных систем расчета и оптимального проектирования оборудования. Однако для разработки и внедрения информационных технологий необходимо сформировать банк простых и удобных в практических расчетах моделей кинетики диспергирования и механоактивации, разработать и наполнить банк данных результатов опробования моделей на примерах измельчения различных материалов в мельницах разных типов.

Стохастические модели на основе Марковских процессов просты, наглядны, носят обобщенный характер. Эти модели универсальны и применимы для описания процессов диспергирования и механоактивации различных по своей природе гетерогенных систем. С другой стороны, в стохастической теории накоплен богатейший арсенал математических средств теоретического анализа случайных процессов, который может быть ис-

пользован для продуктивного анализа моделей кинетики диспергирования и механоактивации. На основе системного подхода реализуют разделение рассматриваемого процесса на независимые составляющие (объемы), инвариантные к масштабу аппарата, а затем отдельное их изучение с выражением результатов в математической форме [48-51]. При этом важно выбрать элементарный объем. Математическое описание в целом получается путем синтеза функциональных операторов отдельных уровней.

Однако исследователи сталкиваются с необходимостью экспериментально находить в процессе моделирования матрицу измельчения для каждого материала и конкретных технологических параметров процесса [24, 51]. Это не дает возможности создать обобщенную модель тонкого измельчения.

1.5 Изучение эмиссионных эффектов при разрушении и измельчении

Для исследования процесса разрушения и, в частности, измельчения, возможно применить метод, использующий эффект акустической эмиссии при разрушении материалов. Акустическая эмиссия (АЭ) – это физическое явление, связанное с излучением упругих волн из твердого тела при его нагружении [13]. Затраты энергии на измельчение связаны с возникновением и развитием трещин в процессе разрушения нагружаемого твердого тела. Диспергирование завершает процесс разрушения, развивающийся в нагружаемом твердом теле. В согласии с принципом концентрационного укрупнения трещин формирование тонкодисперсных частиц происходит предпочтительно в зонах трещинообразования нагруженного тела.

В связи с тем, что определенная часть выделившейся при разрушении энергии переходит в акустическую энергию, современные методики и аппаратные акустические средства технической диагностики микро - и макро-разрушения применимы для выявления эффектов диспергирования на основе информации о формировании областей акустической активности.

Метод акустической активности широко используется при неразрушающем контроле различных конструкций, деформировании и разрушении металлов. Значительный вклад в усовершенствование метода АЭ внесли работы таких отечественных и зарубежных ученых, как В.И. Иванов, С.И. Буйло, Ю.Б. Дробот, И.В. Гулевский, В.А. Гречишников, О.В. Гусев, С.А. Недосека, Б.Е. Патон, Р.Р. Скальский, В.В. Шип и др.

Значительные успехи при анализе предвестников разрушения были достигнуты при исследовании процессов ползучести и сейсмологии, разрушении геологических сред. Основы данного направления были заложены в работах М.А. Садовского, Г.А. Соболева, С.И. Журкова, Е.И. Шемякина, С.Д. Виноградова, В.С. Куксенко и др.

Многие исследователи искали корреляцию между параметрами трещин и характеристиками акустического излучения [14 - 17]. Основой прогнозирования разрушения конструкционных материалов есть наблюдения за кинетикой повреждений. В методе акустической эмиссии в качестве информативных параметров используются временные зависимости и абсолютные значения количества импульсов, которые регистрируются, вид и параметры частотного спектра сигналов акустической эмиссии, распределений амплитуд сигналов, временных интервалов между импульсами и прочее.

Сигнал акустической эмиссии несет информацию о размере трещины, скорости ее роста, напряжений в местах зарождения, упругих свойствах материала. Получить количественную информацию об указанных параметрах тяжело. Это объясняется тем, что акустические сигналы, регистрируемые преобразователями акустической эмиссии, значительно искажаются за счет суперпозиции волн разного типа, отражающихся от границ объекта, сигналов энергоносителя, сигналов самого преобразователя.

Увеличение трещины создает близ себя большие механические пере-напряжения, которые вносят изменения в процесс разрушения. Такое значительное отклонение настоящих параметров процесса реально наблюда-

ется только перед разрушением. Более раннее отклонение регистрируемых параметров потока акустической эмиссии обычно вызвано сильным искажением и наложением принимаемых сигналов акустической эмиссии. Вместе с тем определено, что еще задолго до появления макро дефекта происходят изменения в «тонкой структуре» потока актов акустической эмиссии [15]. Начинается как бы «группирование» актов акустической эмиссии, и процесс акустической эмиссии переходит в пуассоновский поток сгруппированных актов акустической эмиссии. Установление факта группирования в сигналах акустической эмиссии позволяет определить самые ранние стадии разрушения. Тип АЭ определяется характером дефектов и процессом разрушения: упругие деформации сопровождаются всплеском АЭ; пластическая деформация сопровождается непрерывной АЭ; развитие магистральных трещин – импульсами высокой амплитуды.

Для АЭ метода характерно отсутствие прямого воздействия на исследуемый объект и возможность непрерывного наблюдения за процессом, поэтому параметры акустической эмиссии (АЭ) успешно используют для изучения физических процессов трещинообразования и разрушения в различных технологических и природных процессах [14-17].

Акустическое излучение контролируется суммарным счетом, а также величиной длительности и амплитуды акустических сигналов (АС). Согласно опытным данным, в диапазоне размеров трещин от 0,1 мм до 1 мкм длительность t (с) АС линейно связана (в двойных логарифмических координатах) с размером образовавшейся трещины l (м): $t = \frac{\alpha l}{v}$, где v – скорость роста трещины, α – коэффициент пропорциональности. Изменение амплитуды сигналов АЭ указывает на изменение размера трещин, их развитие в очаге разрушения. Исследования показали, что характерная амплитуда сигналов АЭ на начальной стадии нагружения сжатием составляет десятки мВ; в дальнейшем процессе трещинообразования и укрупнения микротрещин величина амплитуды возрастает до $A \cong 14$ В.

Метод АЭ успешно используется для прогнозирования разрушения нагружаемого объекта по изменению амплитуды временных спектров АЭ. На основе установленных связей параметров разрушения и акустического излучения при нагружении модельных образцов горных пород [16-17] можно полагать, что прогнозирование показателей измельчения - реально. При этом ведущая роль отводится характеристикам акустической эмиссии на стадии запредельного деформирования и разрушения. Установленная зависимость количества образованных тонких фракций от удельного (на единицу объема) числа сигналов АЭ при разрушении сжатием служит доказательством обоснованности применения метода АЭ для прогнозной оценки измельчаемости материалов.

В этой связи актуально исследование условий применения АЭ мониторинга процесса измельчения для установления рациональных или энергетически выгодных режимов получения тонкодисперсных продуктов из различных твердых материалов

Во многих работах, посвященных современным представлениям физике разрушения, рассматривалось явление трещинообразования и последующее разрушение интегрально, т.е. фиксировались трещины во всем объеме за выбранный интервал времени. Но такой подход не дает возможности рассмотреть процесс образования и развития отдельной трещины. Для этих целей используется метод акустической эмиссии.

Метод акустической эмиссии, как средство акустико-эмиссионного мониторинга, может служить основой исследования разрушения материалов при тонком измельчении. Но для этого необходимо определить взаимосвязь акустических параметров, АЭ-критериев и режимов, технологических параметров процесса.

1.6 Анализ возможностей акустического мониторинга измельчения

Для измельчения полезных ископаемых и других материалов используют различные виды мельниц, отличающиеся типом воздействия на материал. В процессе измельчения разрушение осуществляют под действием механических, тепловых или электрических сил, направленных на преодоление внутренних сил сцепления частиц твердого тела. На практике измельчение с целью уменьшения размеров кусков до заданной крупности происходит под действием внешних механических усилий, создаваемых рабочими органами измельчительного агрегата, или при соударении частиц в струях энергоносителя.

Для тонкого измельчения руд чаще всего используются барабанные (шаровые, строжневые), вибрационные мельницы, относящиеся к первому способу разрушения, и струйные мельницы.

Достоинствами *барабанных* мельниц является простота конструкций и удобство в эксплуатации. К недостаткам следует отнести невысокие скорости движения мелющих тел и материала, объем барабана используется не полностью. Опыт эксплуатации барабанных мельниц [26] показал, что наиболее рациональным является избирательное измельчение материала, когда крупные частицы измельчаются ударом, а мелкие – истиранием. Таким образом, режим работы мельниц должен обеспечивать чередование ударного режима с истиранием, что достигается использованием специальной футеровки элементов. Для получения тонкодисперсного продукта используются шаровые мельницы на критических скоростях работы.

Вибрационные мельницы можно использовать для сухого и мокрого измельчения.

Для тонкого измельчения (получаемый продукт до 20 - 5 мкм) этот вид мельниц имеет ряд преимуществ перед традиционными барабанными мельницами подобной производительности: меньшая энергоемкость процесса, металлоемкость и площадь для оборудования.

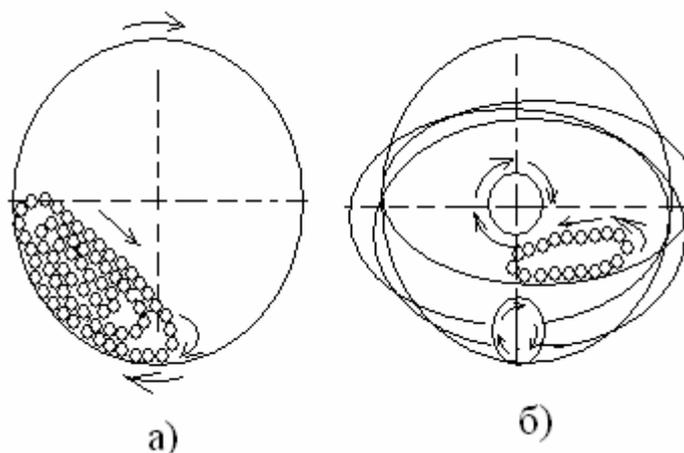


Рисунок 1.2 Схема рабочего процесса в барабанной (а) и вибрационной (б) мельницах

Продукты более однородные по составу и имеют менее округлую форму, больше угловатых частиц. К недостаткам вибромельниц следует отнести зависимость крупности кусков питания от размеров шаров и амплитуды колебаний мельницы, особые требования к надежности конструкции мельницы, связанные с работой в быстроходном вибрационном режиме.

Планетарные мельницы представляют собой агрегат, составленный из нескольких небольших барабанных мельниц, соединенных на одной основе. В процессе работы барабанные мельницы вращаются вокруг своих осей и вокруг оси основы. Планетарные мельницы обладают высокой удельной производительностью, низкой энергоемкостью. Эти мельницы могут быть периодического и непрерывного действия, могут работать в режиме самоизмельчения. Измельчение материалов происходит в основном истиранием, крупность питания до 25мм.

Наиболее перспективным способом тонкого и сверхтонкого измельчения, на наш взгляд, в настоящее время является способ высокоскоростного измельчения материалов, реализуемый путем придания ускорения измельчаемым частицам при помощи струй сжатого воздуха, пара или газа в *струйных* мельницах разного типа. Использование высоких скоростей,

до нескольких сотен метров в секунду, в установках газоструйного противочного типа, позволяет повысить и регулировать дисперсность получаемого продукта, избежать привнесения примесей и загрязнения в продукты.

Такие струйные мельницы имеют ряд преимуществ:

- простота конструкций;
- относительно невысокий расход энергоносителя за счет малого количества рабочих сопел;
- возможность работы мельницы в замкнутом цикле, что упрощает классификацию порошков;
- экологичность устройств.

Газодинамический способ измельчения, реализуемый в струйных мельницах, является одним из наиболее перспективных для получения высокодисперсных (микронизированных) порошков с размерами частиц – доли, единицы и десятки микрон. Возможность достижения высокой дисперсности продуктов с поверхностью порядка единиц $\text{м}^2/\text{г}$ заложена в высокودинамичном действии струй звуковой и сверхзвуковой скорости на ускоряемые частицы [27, 28]. В процессе измельчения, когда частицы твердых тел испытывают высокоскоростные соударения друг с другом (например, в струйной мельнице) и время их взаимных соударений (время накачки энергией) соизмеримо со временем разрушения, развиваются особенно интенсивно авторезонансные процессы их разрушения. Выявлены информативные параметры акустического образа для предразрушающей стадии, которые коррелируют с характеристиками напряженно-деформированного состояния нагружаемого материала. К ним относятся энергетический выход (счет сигналов, отнесенный к работе деформации), активность N (счет сигналов в единицу времени), акустоэмиссионная эффективность процесса разрушения (счет сигналов, приведенный к единице относительной деформации), удельное акустическое излучение, амплитуды сигналов и их распределение по величине, длительность акустического

затишья [10]. Это может служить основой акустического мониторинга струйного измельчения. Однако необходимо установить связи между технологическими и акустическими параметрами процесса.

Обоснование цели и задач исследования.

Проведенный анализ исследований и разработок в области тонкого измельчения показал, что расширение круга измельчаемых материалов, повышение требований к их гранулометрическому составу, повышение спроса на тонкодисперсные материалы, производство которых довольно энергоемкое, вызывает необходимость развивать теоретический и экспериментальный поиск оптимальных режимов измельчения.

Проведение экспериментальных исследований по выбору требуемых технологических параметров измельчения в каждом конкретном случае является достаточно дорогостоящим, поэтому повышается роль теоретических исследований, математического моделирования процессов измельчения. Существующие кинетические уравнения, модели, основанные на экспериментальных данных и только качественно описывающие процессы измельчения, не всегда подходят для анализа тонкого измельчения и своевременного выбора оптимальных режимов измельчения.

Для решения *проблемы* установления механизма формирования гранулометрического состава продуктов измельчения для достижения необходимой дисперсности при минимальном энергопотреблении необходимо выяснить энергетические, кинетические особенности тонкого измельчения и уменьшения крупности, изменения гранулометрического состава материала при измельчении в замкнутом цикле. На этой основе необходимо реализовать моделирование процесса, разработку технологии и обоснования технологических и режимных параметров процесса, обеспечивающих снижение энергоемкости получения тонкодисперсных порошков. Снижение энергоемкости тонкого измельчения при получении продуктов тре-

буемой дисперсности возможно на основе устранения противоречий между необходимым увеличением производительности оборудования и требованием снижения энергетических затрат при производстве тонкодисперсных продуктов.

Для выяснения энергетических особенностей тонкого измельчения минерального сырья необходимо установить зависимость вновь образованной удельной поверхности от потребляемой энергии. Исследователи, изучая кинетику измельчения, выдвигали различные виды этой зависимости. Однако предлагаемые уравнения не учитывают особенности измельчения тонкодисперсных руд. Необходимо реализовать возможность описания процесса уравнением кинетики тонкого измельчения вкрапленных руд с позиций изменения удельной поверхности. Целесообразно проверить применимость уравнения Риттингера для тонкого и сверхтонкого измельчения руд. Необходимо изучить энергетические особенности измельчения разных классов крупности частиц минералов в процессе измельчения их смеси.

Развитие научных основ тонкого измельчения материалов в замкнутых циклах связано с моделированием процесса на базе известных подходов применительно к тонкому измельчению и разработкой нового метода непрерывного контроля процесса. Моделирование тонкого измельчения должно включать: разработку рациональных схем замкнутых циклов измельчения, динамическое моделирование и построение стохастической модели. Использование эмиссионных эффектов при измельчении позволит применить информационные технологии для мониторинга и идентификации процесса тонкого измельчения

Предложенные способы следует исследовать на примере струйного измельчения, как наиболее динамичного вида тонкого измельчения руд. На основе метода акустической эмиссии, контролирующего эффекты разрушения, целесообразно обосновать применение акустико-эмиссионного мониторинга процесса. В этой связи необходимо определить информацион-

ные акустические параметры, критерии и режимы тонкого измельчения. Важно провести поиск рациональных или энергетически выгодных режимов получения тонкодисперсных продуктов из различных твердых материалов, что составит основу управления процессом тонкого измельчения на основе акустического мониторинга.

С учетом высокой энергоемкости тонкого измельчения, в частности струйного измельчения, необходимо разработать научные подходы к снижению удельных энергозатрат на измельчение в замкнутых циклах на основе использования информационных технологий для анализа результатов акустического мониторинга и установления критериев оптимизации процесса. Следует создать базу данных и разработать систему анализа акустических сигналов зоны измельчения и классификации, которая позволит идентифицировать технологические режимы на основе энергетического и нейросетевого анализа сигналов мониторинга измельчения. Графические методы идентификации режимов и представления результатов мониторинга улучшат наглядность и повысят оперативность оптимизации процесса тонкого измельчения руд.

Все полученные результаты необходимо проверить и опробовать в условиях промышленного измельчения полезных ископаемых.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ С ПОЗИЦИИ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЗАТРАТ

2.1 Анализ энергетических особенностей тонкого измельчения

Технологической задачей измельчения на обогатительных фабриках является раскрытие минералов тонковкрапленных руд. Раскрытие должно осуществляться при минимальном переизмельчении вкраплений. На переизмельчение дополнительно расходуется энергия, а образовавшиеся тонкодисперсные частицы ухудшают условия сепарации минералов, что приводит к потерям полезного компонента.

Для снижения влияния указанных факторов в промышленности используют технологии измельчения в замкнутых циклах. Идеология замкнутых циклов состоит в том, что из мельницы за счет движения транспортирующей среды (вода, воздух) извлекают заведомо недоизмельченный материал, который во внешнем классификаторе (гидравлические и пневматические классификаторы, циклоны, грохоты) разделяется на готовый по крупности продукт и крупный, направляемый на доизмельчение в ту же мельницу. Этот продукт является циркулирующей нагрузкой.

К измельчаемому материалу в мельнице через измельчающую среду с определенной интенсивностью (например, пропорциональной мощности электропривода) подводится энергия, которая расходуется на деформацию измельчаемого материала и образование новой поверхности при его разрушении. Удельные энергозатраты на единицу массы измельченного материала при этом составит $E_{y\partial} = N/Q$, кВт·ч/т, откуда следует, что снижение энергопотребления при измельчении в данном агрегате возможно при увеличении его производительности при условии выполнения технологической задачи – получение измельченного продукта с заданной дисперсностью.

Исходя из идеологии замкнутых циклов, из измельчаемого материала (исходный материал, циркулирующая либо комбинированная нагрузка) перед

подачей его в мельницу необходимо удалить частицы, крупностью менее крупности готового продукта. Кроме того, при мокром измельчении необходимо кондиционировать пульпу по содержанию твердой фазы, т.е. классификация по крупности должна осуществляться перед подачей материала в мельницу и при выходе из него. Однако, технологическая необходимость применения предварительной классификации, либо совмещения ее с контрольной классификацией определяется конкретными условиями процесса.

Моделирование замкнутых циклов измельчения с целью оптимизации их параметров для увеличения производительности мельницы нами принято в работе [52]. Основой этого моделирования является то, что прирост вновь образованной поверхности, согласно гипотезе Риттингера, пропорционален энергии, потраченной на ее образование. Увеличившей поверхности соответствует новая дисперсность, которая описывается соответствующей функцией распределения. Необходимо рассмотреть применимость гипотезы Риттингера и причины значительного повышения энергоемкости тонкого, сверхтонкого измельчения.

Дальнейшее развитие такого подхода должно осуществляться после установления функций распределения частиц по крупности в измельченном продукте и взаимосвязи гранулометрического состава с удельной поверхностью, а также получения уравнения кинетики измельчения на основе пропорциональности величины вновь образованной поверхности измельченных частиц времени процесса.

Многочисленные исследования закономерностей измельчения позволили выделить главную характеристику, которая связывает вновь образованную удельную поверхность при измельчении с энергозатратами на этот процесс (см. рис.2.1).

В этой характеристике можно выделить 3 участка:

Первый – линейно связывает вновь образованную удельную поверхность с энергозатратами. Это соответствует помолу достаточно крупных частиц.

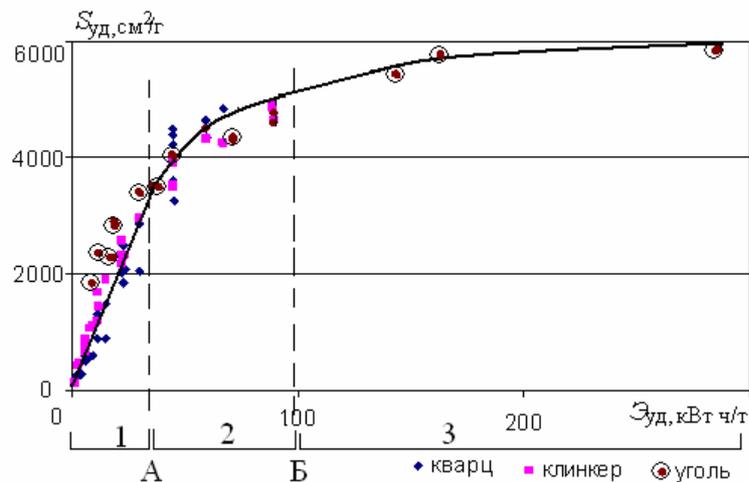


Рисунок 2.1 – Зависимость удельной поверхности от удельного расхода энергии.

0-А – область линейной связи; Б – критический порог.

А-Б – область накопления тонких частиц;

По мере того, как появляются тонкие частицы, энергии на разрушение таких частиц приходится затрачивать больше, и поэтому чувствительность упомянутой характеристики снижается (участок 2 на рис. 2.1).

Третий участок соответствует условиям, когда значительно увеличилось число тонких частиц, поэтому необходимо разрушать частицы, близкие по размерам к молекулам. Естественно, что для такого разрушения необходимо потратить огромную энергию, поэтому характеристика $S_{уд}(\mathcal{E}_{уд})$ становится еще менее чувствительной. Таким образом, граница между 2-м и 3-им участками для функции $S_{уд}(\mathcal{E}_{уд})$ является границей возможностей механического раскрытия ценных компонентов и, вообще, применения механического обогащения. С целью снижения громоздкости выражения назовем эту границу (прямую Б) критическим уровнем.

Следовательно, не имеет смысла переходить через критический уровень, а если такой переход осуществляется, то нужно изменить процесс измельчения в сторону снижения энергозатрат. Отсюда возникает задача определения условия перехода процесса измельчения через критический уровень,

и в случае такого перехода, вернуть процесс через эту границу к меньшему значению энергопотребления, т.е. параметры измельчительного процесса должны изменяться в узких пределах изменения энергопотребления.

Итак, основной задачей тонкого измельчения является обнаружение перехода энергопотребления за установленный уровень, как в сторону увеличения, так и сторону уменьшения.

2.2 Обоснование критического уровня энергоемкости как основы управления процессом

Превышение критического уровня говорит о том, что накопилось значительное количество частиц, достаточно мелких, но требующих дальнейшего снижения их размера, т.е. необходимо снизить производительность измельчительного аппарата. Уменьшение критического уровня говорит о том, что измельчительный процесс имеет некоторый резерв, и измельчительный агрегат может увеличить свою производительность.

Чем труднее измельчается материал, тем больше получается песков (циркулирующей нагрузки). Тем не менее, может установиться такой режим, когда количество песков неограниченно увеличивается, и, в результате, измельчительный аппарат также неограниченно принимает нагрузку и может достичь такого режима, когда он не в состоянии переработать поступающий в него материал. Это может привести к аварийной ситуации. Чтобы избежать такого режима, необходимо отключить поток свежего материала до тех пор, пока количество песков (циркулирующая нагрузка) не снизится до приемлемого (критического) уровня. Таким образом, циркулирующая нагрузка является управляющим воздействием, которое может существенно изменять производительность замкнутого цикла измельчения. После того, как этот уровень будет достигнут, можно снова увеличить подачу свежего материала в цикл измельчения.

Проведенные рассуждения позволяют сделать вывод о том, что необ-

ходим выбор скачка изменения производительности цикла измельчения по исходному материалу, когда происходит переход его через критический уровень. В этом состоит вторая задача поиска оптимальной работы измельчительной установки.

Наконец, необходимо определить по состоянию цикла измельчения момент перехода режимом измельчения критического уровня. В этом состоит третья задача исследований.

Решение перечисленных трех задач позволит решить проблему создания оптимальных условий сверхтонкого помола, который, как известно, является весьма энергоемким в связи с тем, что, как отмечалось ранее, частицы приближаются к микронным размерам.

Исследования [53-54], проведенные на железорудных комбинатах по определению зависимости выхода готового класса в процессе измельчения от энергопотребления мельницы показал, что эта зависимость существенно нелинейная и в ней можно выделить два участка (см. рис. 2.2): первый участок (0-Б) имеет высокую чувствительность, второй участок правее линии Б – эта зависимость имеет значительно меньшую чувствительность.

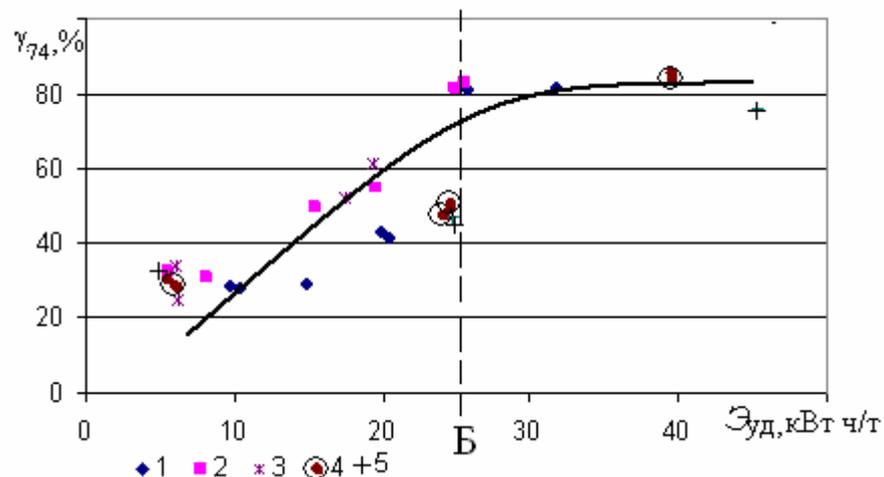


Рисунок 2.2 – Зависимость содержания готового класса в продукте измельчения от удельного энергопотребления для рудоразмольных мельниц горно-обогатительных комбинатов Криворожского железорудного бассейна: 1 – Южный, 2 – Ново-Криворожский, 3 – Центральный, 4 – Северный, 5 – Ингулецкий.

Поскольку на рис. 2.2 показаны результаты различных предприятий, то зависимость имеет большую долю случайного, поэтому несколько размыто, но два участка четко отличаются, что подтверждают ранее сделанные выводы.

С целью подтверждения полученных результатов при исследовании тонкого шарового измельчения и проверки применимости гипотезы Риттингера к тонкому и сверхтонкому сухому измельчению проводились экспериментальные исследования на лабораторной струйной мельнице УСИ- 20 (производительностью 20 кг/ч). Исследовалась зависимость удельной поверхности продукта от энергозатрат при тонком измельчении сыпучих материалов разных свойств. Результаты измельчения кварца, известняка, шлака, шамота и циркона приведены на рис. 2.3. Характер прямо пропорциональной зависимости сохраняется, как и при мокром измельчении в барабанных мельницах. При сухом струйном измельчении также наблюдаются три характерных участка зависимости удельной поверхности от энергоемкости процесса, и выделяется критический уровень энергопотребления (точка Б). Однако характерные интервалы энергопотребления короче, и угол наклона зависимости при увеличении дисперсности продукта значительно меняется. Так, уравнение зависимости в полулогарифмических координатах для тонких продуктов ($S_{y\partial} < 4500 \text{ см}^2/\text{г}$ – прямая 2 и $4500 < S_{y\partial} < 6000 \text{ см}^2/\text{г}$ – прямая 3) имеет, соответственно, вид

$$\begin{aligned} \lg S_{y\partial}^1 &= 0,036\mathcal{E}_{y\partial} + 3,1, \\ \lg S_{y\partial}^2 &= 0,0026\mathcal{E}_{y\partial} + 3,63, \end{aligned} \quad (2.1)$$

для сверхтонких ($S_{y\partial}$ более $6000 \text{ см}^2/\text{г}$) –

$$\lg S_{y\partial}^3 = 0,0004\mathcal{E}_{y\partial} + 3,73. \quad (2.2)$$

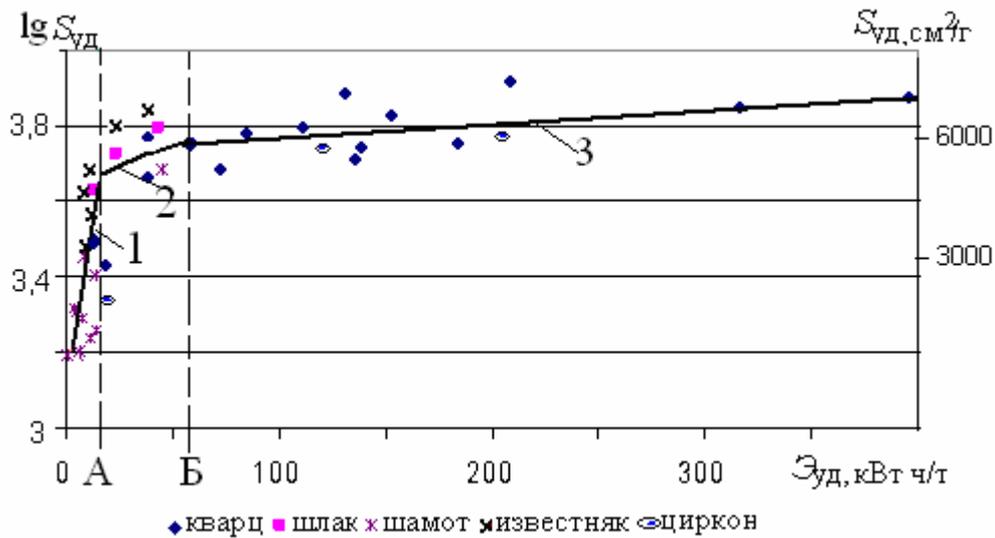


Рисунок 2.3 – Зависимость удельной поверхности от энергоемкости процесса тонкого измельчения на лабораторной струйной мельнице.

Таким образом, при сухом струйном измельчении также наблюдается три характерных участка зависимости удельной поверхности от энергоемкости процесса, и выделяется критический уровень энергопотребления (точка Б). При этом струйное измельчение позволяет получать более тонкий продукт с более высоким показателем дисперсности ($S_{уд}$ до $8000 \text{ см}^2/\text{г}$), т.к. процесс измельчения в струях более динамичный. Это подтверждается уравнениями зависимостей удельной поверхности от энергоемкости для тонкого измельчения в струйной и шаровой мельницах на рис. 2.4, где уравнение зависимости $S_{уд}^1 = 182,4\mathcal{E}_{уд} + 1057,5$ (прямая 1) для струйного измельчения и $S_{уд}^1 = 95,5\mathcal{E}_{уд} + 28,2$ (прямая 2) для измельчения в шаровой мельнице. Коэффициенты наклона прямых показывают динамичность процесса измельчения ($k_1 = 182,4$; $k_2 = 95,5$).

Исследованием струйного измельчения различных материалов установлена связь угла наклона зависимости $S_{уд}(\mathcal{E}_{уд})$ (коэффициента измельчаемости материала) от свойств материала, в частности от его плотности (см. рис. 2.5).

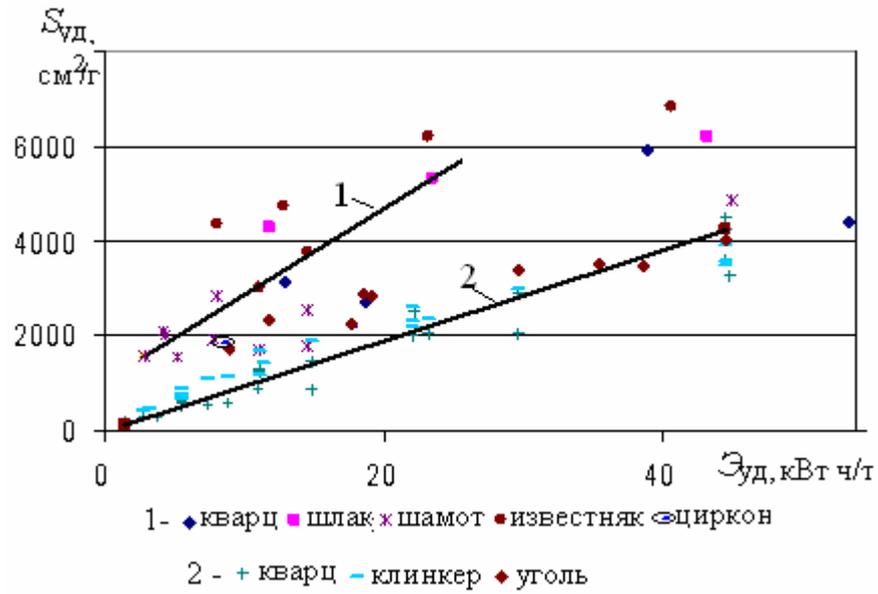


Рисунок 2.4 – Зависимости удельной поверхности от энергоёмкости при струйном (1) и шаровом (2) измельчении.

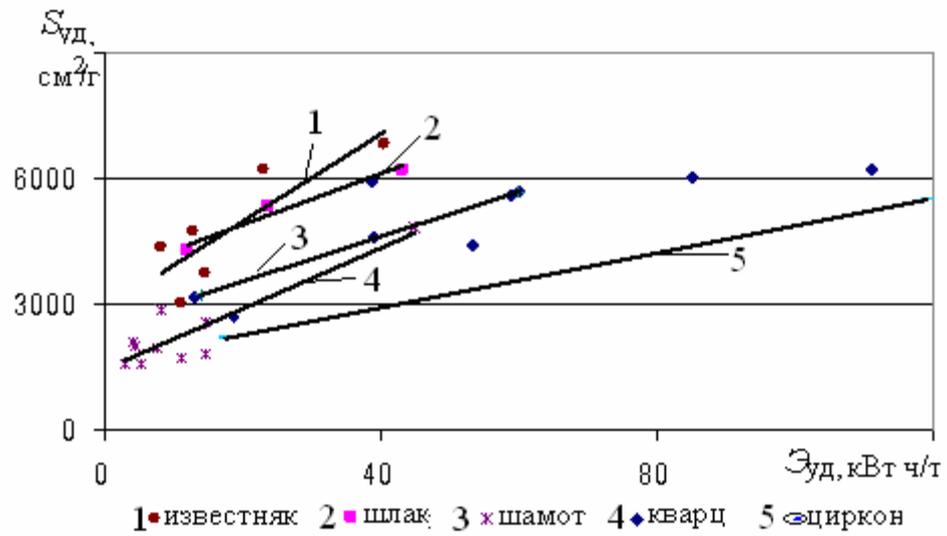


Рисунок 2.5 – Зависимость удельной поверхности от энергоёмкости струйного измельчения различных материалов

Для рассмотренных материалов эта зависимость имеет вид (см. рис. 2.6)

$$K(\rho) = 24,7\rho^2 - 204\rho + 446. \quad (2.3)$$

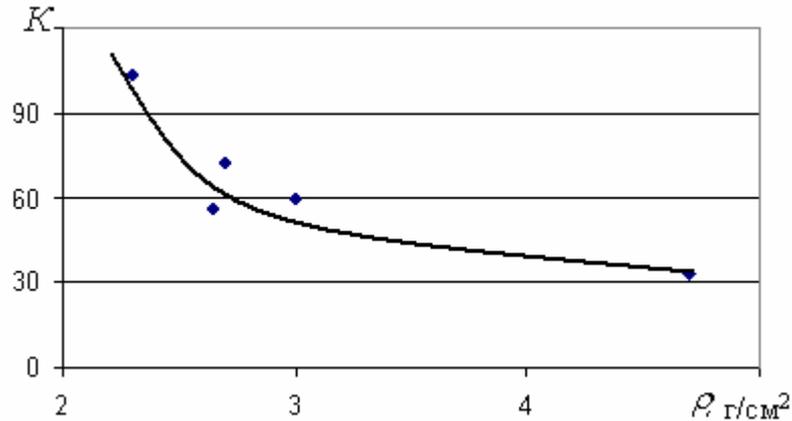


Рисунок 2.6 – Зависимость коэффициента пропорциональности удельной поверхности и энергоёмкости от плотности продуктов струйного измельчения

Уравнения зависимости удельной поверхности измельченных продуктов от энергоёмкости струйного измельчения представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

№ п.п.	Материал	Уравнение
1	известняк	$S_{y\partial} = 102,8\mathcal{E}_{y\partial} + 2925,5$
2	шамот	$S_{y\partial} = 71,8\mathcal{E}_{y\partial} + 1450$
3	шлак	$S_{y\partial} = 60,1\mathcal{E}_{y\partial} + 3686$
4	кварц	$S_{y\partial} = 54,4\mathcal{E}_{y\partial} + 2439$
5	циркон	$S_{y\partial} = 33,1\mathcal{E}_{y\partial} + 1584$

Анализ продуктов тонкого измельчения показал закономерное повышение энергоёмкости мельницы при достижении определенной величины размера частиц продуктов. Для шарового измельчения эта величина состави-

ла 40-60 мкм. На примере струйного измельчения материалов установлено, что критическим уровнем является величина размера частиц порядка 10-15 мкм. Результаты ситового анализа гранулометрического состава продуктов струйного измельчения не дали возможность оценить размеры частиц продуктов (см. табл. 1 Приложения А), поскольку остаток на предельном сите – 40 мкм составлял в большинстве случаев более 90%.

В [58] показано на примере тонкого измельчения клинкера и известняка в шаровой мельнице, что прочность частиц увеличивается с уменьшением размера. Эту закономерность можно описать экспоненциальным законом $\sigma(d) = 88,2d^{-0,872}$ с коэффициентом корреляции $R = 97,5$. Соответствующий график представлен на рис. 2.7.

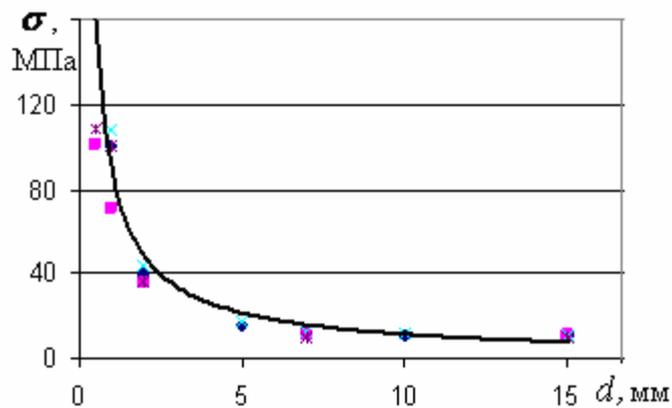


Рисунок 2.7 – Зависимость прочности частиц от их размера

Видно, что прочность частиц резко увеличивается при достижении их размера величины $d_{кр}=2,5$ мм. При струйном измельчении частицы такого размера являются исходным материалом для измельчения. Поэтому струйное измельчение более энергоемкое и критические размеры частиц продукта для оптимальной энергоемкости меньшего порядка.

Проведенный анализ гранулометрического состава продуктов на аппарате «Malvern» показали, что преобладающий (>90%) размер частиц продуктов струйного измельчения различных материалов составляет 2-1 мкм, а их средневзвешенный размер – до 10мкм. В табл. 2.2 показаны результаты ана-

лиза гранулометрического состава, средневзвешенный диаметр и удельная поверхность шлака, кварца, шамота и циркона, измельченных струйным сухим способом при разных оборотах классификатора. Измерения проведены на аппарате «Malvern» в условия Вольногорского горнометаллургического комбината (ВГМК).

Таблица 2.2

Результаты анализа продуктов струйного измельчения
аппаратом «Malvern» ВГМК (остатки «по плюсу»)

	$d_{cp, MKM}$								$d_{\text{средне-}}взвешенный \cdot \cdot$ МКМ
	56,5	45	30	15	7,5	3,75	1,875	0,63	
$S_{уд},$ $см^2/г$	Суммарные характеристики «по плюсу», %								
	циркон								
1758	1,24	12,6	15,7	16,26	54,54	67,7	81,8	100	10,36674
1550	1,71	3,7	18,9	38,62	55,79	68,3	83,8	100	10,61391
1907	0,19	1	14,2	35,3	55,61	67,8	82,9	100	9,96808
1668	1,32	2,2	14,9	35,72	55	66,6	82,12	100	10,08824
2605	0,21	0,7	8,8	25,95	44,55	58,85	76,6	100	7,741833
2451	0,12	0,6	8,74	27,75	46,61	60,9	78,4	100	7,99188
2162	1,32	2,6	15	35,51	54,29	67,6	82,35	100	10,11994
1609	1,55	3,2	16,8	39,55	58,17	70,4	84,3	100	10,99206
1691	1,35	3,7	16,85	38,06	55,68	68,58	83,38	100	11,02611
1702	1,54	3,2	16,58	36,26	53,24	66,6	82	100	10,47725
	шлак								
2464			1,1	25,8	71,375	93,5	98,475	100	8,385701
2093			1,8	47,6	79,975	94,6	98,475	100	10,46883
4840				0,5	32,4	79,2	93,3	100	4,529085
3665			5	42,9	56,3	86,15	96,075	100	9,520196
3899				9,3	62,8	90,5	97,725	100	6,596051
4836				0,3	23,9	76,75	94,175	100	4,160291

Таким образом, установлено, что интенсивность образования новой поверхности при тонком измельчении твердых полезных ископаемых пропорциональна потребляемой энергии и снижается при достижении крупности измельченного продукта некоторой критической величины, обусловленной

повышением прочности частиц. Величина критического размера частиц зависит от способа измельчения, крупности исходного сырья и свойств материала.

При повышении удельной поверхности производительность мельниц снижается, а удельная энергоёмкость растёт. На рис. 2.8 представлена зависимость изменения производительности измельчения от удельной энергоёмкости процесса для струйной лабораторной мельницы (рис. 2.8а) и шаровой промышленной мельницы [19] (рис. 2.8б).

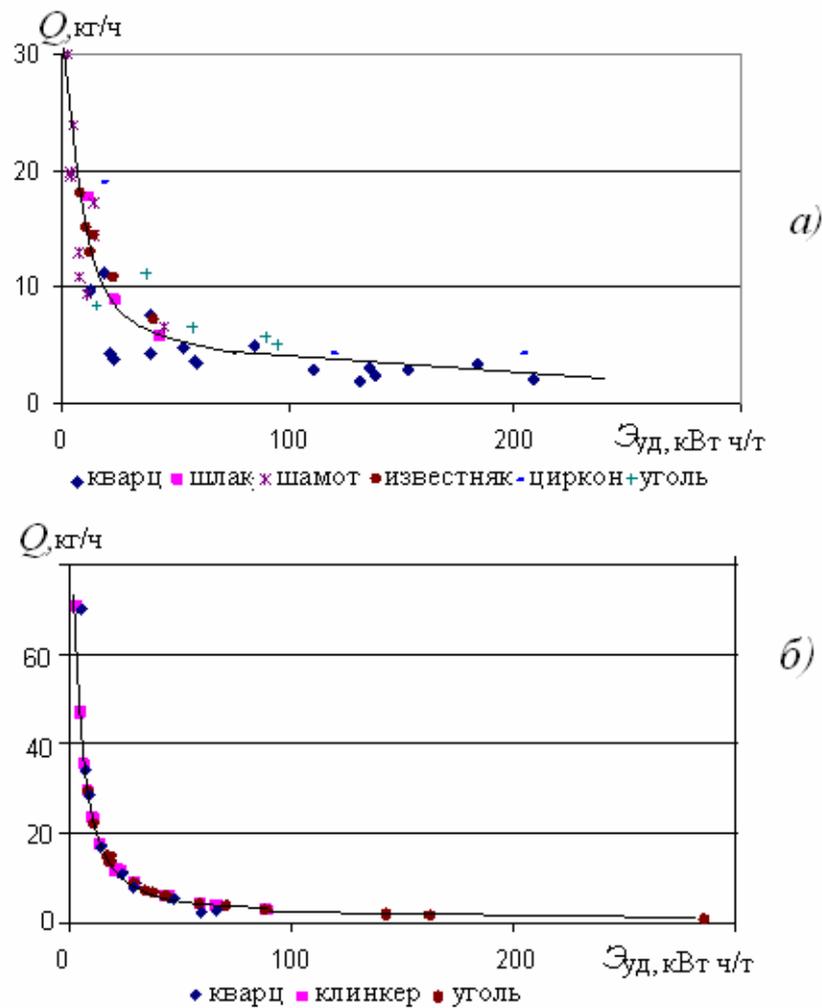


Рисунок 2.8 – Зависимость производительности получения тонкодисперсных продуктов от энергоёмкости процесса получения продуктов разной дисперсности при измельчении в барабанной мельнице

При этом наблюдается тенденция снижения удельной производительности с повышением содержания готового класса в продукте измельчения (рис. 2.9).

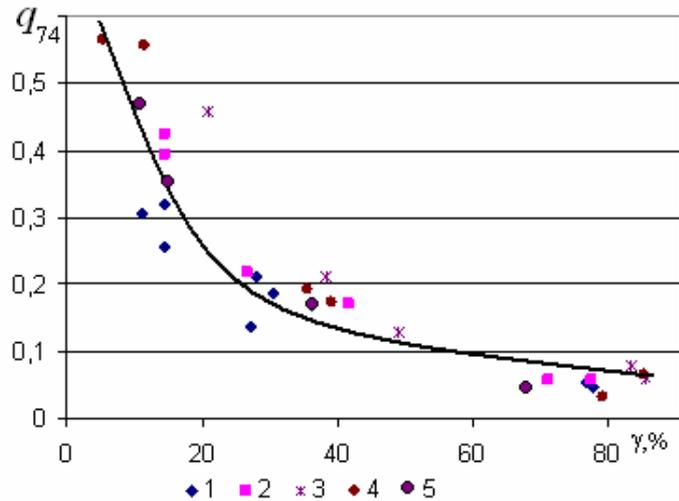


Рисунок 2.9 – Зависимость удельной производительности по готовому классу от содержания готового класса в песках рудоразмольных барабанных мельниц горно-обогатительных комбинатов Криворожского железорудного бассейна: 1 – Южный, 2 – Ново-Криворожский, 3 – Центральный, 4 – Северный, 5 – Ингулецкий

Полученные результаты исследования подтверждают тот факт, что независимо от способа измельчения для получения высокой производительности по тонкому продукту необходимо управлять процессом, чтобы не допустить перехода величины энергоемкости через критическую величину. Для этого используется математическое моделирование и информационные технологии на основе результатов акустического мониторинга процесса тонкого измельчения, представленные в последующих разделах.

2.3 Выявление целесообразности дискретного питания мельницы

Важным этапом в процессе измельчения является первый начальный этап загрузки мельницы. Процесс загрузки может носить непрерывный и

дискретный характер. При первом способе исходный материал поступает в бункер загрузки и далее в помольную камеру непрерывно, и после измельчения непрерывно удаляется из нее. Однако возможен и второй тип процесса загрузки – дискретный, т. е. исходный материал поступает в камеру измельчителя порциями, с определенным интервалом.

Увеличение степени измельчения при первоначальном помоле связано обычно со схемой замкнутого цикла измельчения с классификатором (рис.2.10). Работа такого цикла устойчива.

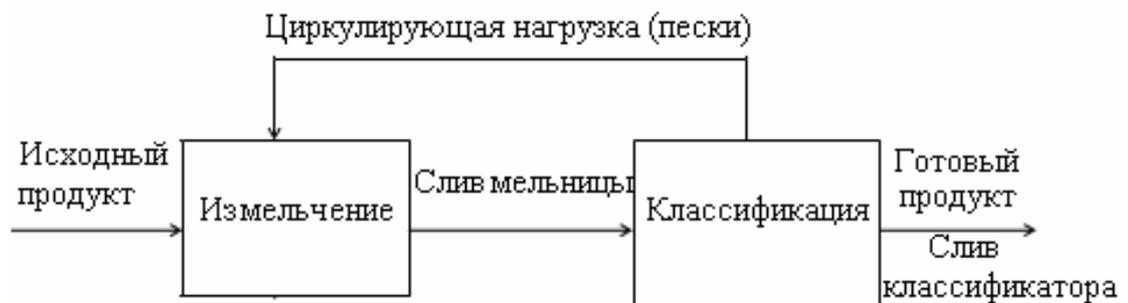


Рисунок 2.10 – Схема замкнутого цикла измельчения с классификатором

При условии, что цикл полностью разгружен, после подачи материала, имеем первый проход его и после разделения в классификаторе получаем количество готового материала (песков)

$$q_{П1} = q_0(1-\gamma_1), \quad (2.4)$$

где q_0 - количество заданного класса крупности на входе измельчения, т.е. исходная производительность мельницы; γ_1 - выход продукта в слив классификатора.

Статическая характеристика шаровой мельницы и замкнутого цикла измельчения имеет экстремальный характер и может быть описана в общем виде параболой

$$Q_{\Gamma} = a_0 + a_1 Q_M - a_2 Q_M^2, \quad (2.5)$$

где Q_{Γ} – производительность мельницы по готовой продукции,

Q_M – производительность по исходной руде.

На рис. 2.11 показан график этой зависимости.

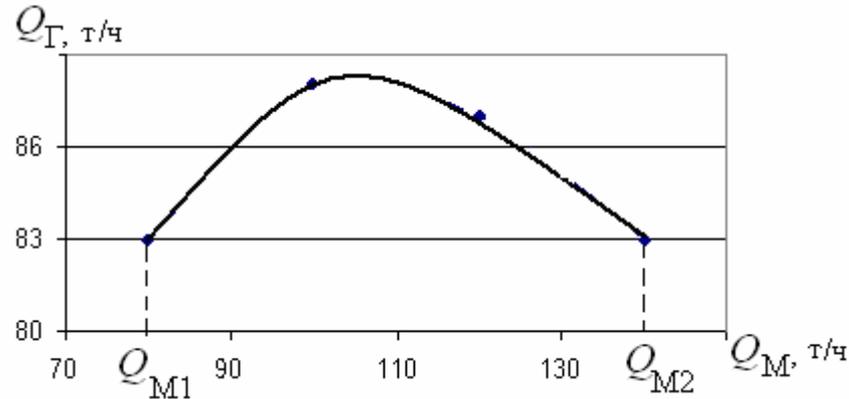


Рисунок 2.11 – Изменение максимальной производительности шаровой мельницы по исходной руде в замкнутом цикле измельчения

Рабочая точка обычно располагается на восходящей ветви характеристики (Q_{M1}) с тем, чтобы был запас по производительности и естественного регулирования: для увеличения Q_{Γ} увеличивают Q_M и наоборот.

Если же мельницу несколько перегрузить, то рабочая точка переместится в точку Q_{M2} на ниспадающей ветви статической характеристики. Производительность по готовому продукту Q_{Γ} будет неизменной, а количество материала в мельнице будет больше. Тогда может возникнуть ситуация, когда с увеличением Q_M производительность по готовому продукту Q_{Γ} будет уменьшаться.

Если же в момент, когда $Q_M = Q_{M2}$ снять нагрузку на мельницу, т.е. прекратить подачу материала, то замкнутый цикл измельчения начнет разгружаться, и рабочая точка по статической характеристике будет двигаться через экстремум, т.е. расход готового продукта будет увеличиваться.

Следовательно, в динамическом режиме возможно увеличение Q_{Γ} за

счет того, что рабочая точка будет блуждать между Q_{M1} и Q_{M2} при увеличении и снижении нагрузки. Таким образом, если в нужные моменты работы замкнутого цикла измельчения подавать нагрузку, которая вызовет смещение рабочей точки в экстремум, а затем снимать нагрузку для смещения рабочей точки в т. Q_{M1} , то можно добиться увеличения производительности по готовому продукту Q_G в работе замкнутого цикла измельчения.

Рассмотрим величину прироста производительности по готовому продукту на основе формулы (2.35).

Из (2.5) следует, что при $Q_M = const$ получаем $Q_G = const$,
 $Q_M = Q_{M \max}$.

Тогда

$$\Delta Q_G = \frac{Q_{M2}}{\Delta Q_M} \int_{Q_{M1}}^{Q_{M2}} (a_0 + a_1 Q_M - a_2 Q_M^2) dQ_M \quad (2.6)$$

При максимальной загрузке и последующей разгрузке прирост производительности по готовому классу составляет:

$$\Delta Q_G = \frac{2}{\Delta Q_M} \left(\frac{a_0}{2} (Q_{M2} - Q_{M1}) + a_1 / 2 (Q_{M2}^2 - Q_{M1}^2) - \frac{a_2}{3} (Q_{M2}^3 - Q_{M1}^3) \right). \quad (2.7)$$

Если давать максимальную загрузку, то резерв остается и динамический режим обеспечивает прирост производительности

$$\Delta Q_G = 2(a_0 + a_1 / 2 (Q_{M2} + Q_{M1}) - \frac{a_2}{3} (Q_{M2}^2 + Q_{M1}^2 + Q_{M1} Q_{M2})) \quad (2.8).$$

Согласно экспериментальным исследованиям [56] $Q_{M1} = 80$ кг/ч и $Q_{M2} = 140$ кг/ч, тогда вид зависимости (2.5) можно представить, как

$$Q_G = 59,09 + 0,47 Q_M - 0,002 Q_M^2 \quad (2.9)$$

В этом случае вид кривой на рис. 2.15 (см. рис.2.12) будет более пологой, и прирост производительности шаровой мельницы по (2.5) составляет $\Delta Q_G = 1,8$ т/ч, что составляет 2,12 % прироста производительности мельницы по готовому классу.

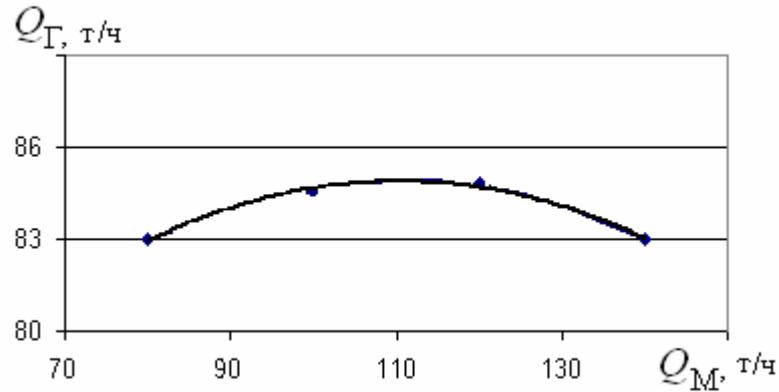


Рисунок 2.12 – Зависимость производительности по готовому продукту от загрузки мельницы

Известно, что энергопотребление зависит от производительности мельницы в замкнутом цикле. Отсюда следует, что удельный расход электроэнергии на измельчение при повышении производительности должен снизиться, т.е. при неизменной мощности электропривода с ростом производительности мельницы снижаются удельные энергозатраты $E = \frac{N}{Q}$, [кВт · ч/т].

Предположим, что мощность привода шаровой мельницы производительностью 100 т/ч составляет 800 кВт. Ниже приведены расчеты удельной расход энергии за час работы мельницы при дискретной и непрерывной загрузке.

Таблица 2.3

Вид загрузки	N , кВт	Q , кг/ч	E , кВт ч/т	$\Delta E = E_2 - E_1$, кВт ч/т
непрерывная	800	83	9,43	0,2
дискретная	800	84,8	9,63	

Таким образом, уменьшение удельного расхода электроэнергии составляет 0,2 кВт · ч/т или 2,17%.

В целом, можно утверждать, что в замкнутом цикле измельчения, где происходит накопление недоизмельченного продукта, (крупнее заданного класса), исходное питание должно подаваться дискретно. Проведенное исследование показало, что максимальная производительность, т.е. максимальный выход заданного класса крупности, в аппаратах с накоплением материала достигается при условии дискретной подачи материала, при этом период дискретности зависит от скорости образования требуемого класса крупности. Это утверждение было подтверждено ниже (раздел 3) при имитационном моделировании замкнутого цикла.

При тонком измельчении с дискретной подачей материала для достижения максимальной производительности необходимо определять скорость образования контрольного класса. Ниже предложен метод вычисления скорости измельчения классов крупности на основе изучения кинетики гранулометрического состава материала.

2.4 Исследование кинетики измельчения фракций крупности в смеси

Для дальнейшего исследования кинетики классов крупности полезных ископаемых и определения скорости изменения контрольного класса, что необходимо для развития научных основ тонкого измельчения в замкнутом цикле, выдвигается и обосновывается гипотеза независимого измельчения классов крупности в их смеси.

Полезные ископаемые представляют собой поликомпонентные системы различных по прочности и измельчаемости минералов. Сыпучий материал, поступающий на измельчение можно рассматривать как смесь отдельных фракций частиц различного размера, разделенных на классы в соответствии с гранулометрическим составом исходного материала. Известно, что частицы разной величины одного и того же материала обладают различными свойствами: прочностью, упругостью, способностью к измельчению [57]. Следовательно, в смеси фракции крупности одного материала имеют разную проч-

ность. Тогда основываясь на независимости результатов измельчения разнопрочных компонентов в смеси [29] можно предположить, что узкие фракции, находясь в составе смеси, измельчаются по своим законам, независимо друг от друга.

Для проверки гипотезы о независимом измельчении частиц разных по крупности фракций проведено экспериментальное измельчение шамота в лабораторной струйной мельнице. Гранулометрический состав исходного материала представлен в таблице 2.4.

Таблица 2.4

Гранулометрический состав исходного шамота.

класс мм	2,5-1,6	1,6-1,0	1,0-0,63	0,63-0,4	0,4-0,315	0,315-0,2	0,2-0,16	0,16-0,1	0,1-0,063	0,063-0,05	<0,05
γ , %	36,42	25,6	7,05	7,8	6,43	5,68	2,96	3,52	2,43	1,09	1,03

Время измельчения задавалось: 1, 2, 4, 8 мин. В конце каждого опыта готовый продукт и циркулирующая нагрузка смешивались, и определялся гранулометрический состав смеси.

На рис. 2.13 показана кинетика измельчения исходного материала, как смеси фракций.

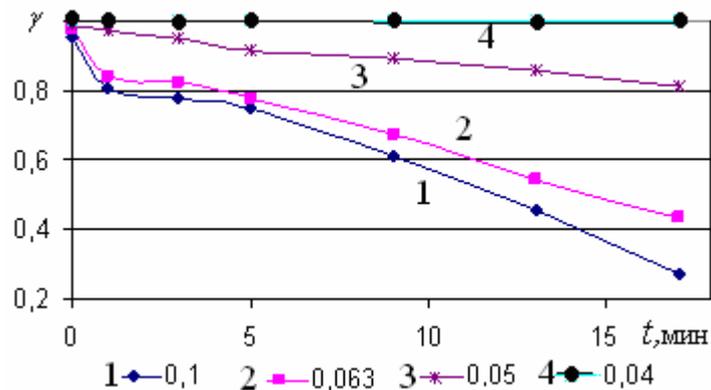


Рисунок 2.13 – Кинетика измельчения исходного шамота

Для исследования закономерностей измельчения выбраны следующие фракции крупности: крупная (-2,5 +1,6 мм), средняя (- 1,0+ 0,63 мм) и мелкая

(-0,315 +0,2 мм) фракции. Условия опытов и методика анализа результатов приняты одинаковыми для исходного материала и выделенных фракций. Результаты определения состава классов представлены в табл. 2.5

Анализ кинетики измельчения осуществлялся по величине остатков на контрольных ситах размером: -0,1, -0,063, -0,05, -0,04 мм. При этом производилось сравнение кинетики измельчения каждой фракции с кинетикой измельчения смеси. На рис. 2.14 представлена кинетика отдельного измельчения фракций крупности материала.

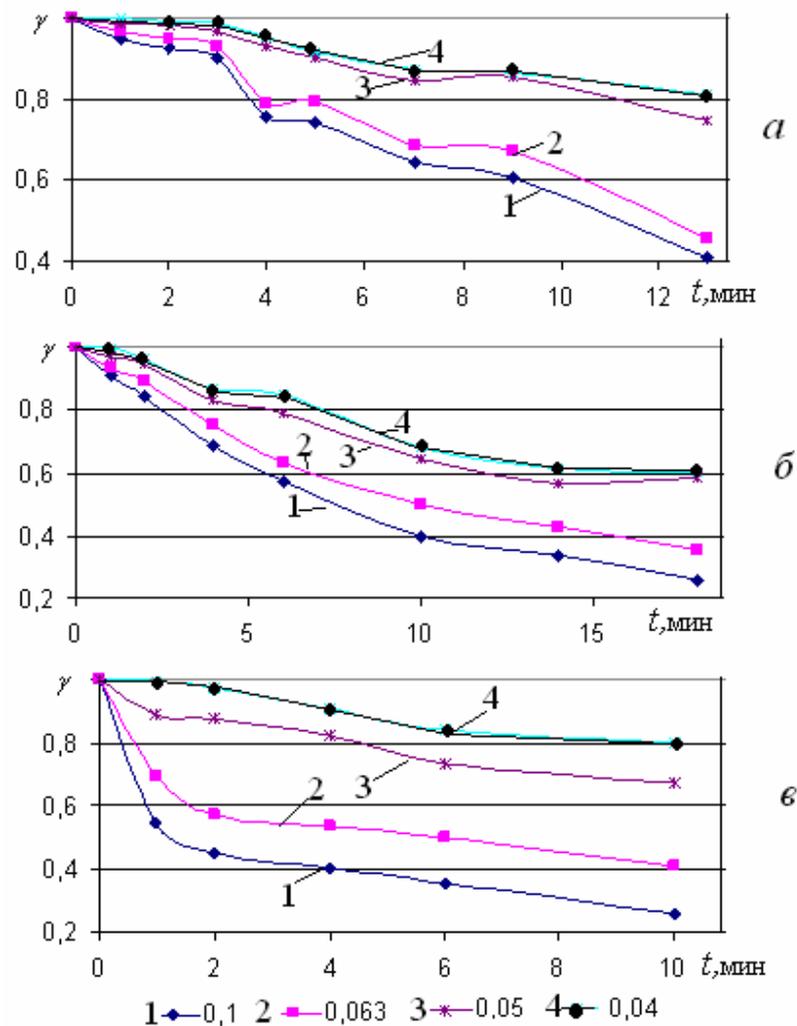


Рисунок 2.14 – Кинетика измельчения выбранных фракций крупности шамота: а – (-2,5 +1,6мм), б – (-1,0+ 0,63мм), в – (-0,315 +0,2мм).

Для сопоставления кинетики отдельного измельчения фракций с их измельчением в смеси (исходный продукт) рассчитывались средневзвешенные

Таблица 2.5

Кинетика струйного измельчения шамота и его фракций крупности

t, мин	2,5-1,6	1,6- 1,0	1,0- 0,63	0,63- 0,4	0,4- 0,315	0,315 -0,2	0,2- 0,16	0,16- 0,1	0,1- 0,063	0,063- 0,05	-0,05
Шамот смесь -2,5 + 0 мм											
0	36,41	25,60	7,05	7,80	6,43	5,68	2,96	3,52	2,43	1,09	1,03
1	29,99	18,34	8,56	7,27	3,49	5,40	2,58	5,03	3,23	12,99	3,12
3	23,25	17,45	10,20	7,39	4,05	6,18	2,77	6,64	4,31	12,81	4,95
5	20,42	17,10	10,09	7,85	4,28	5,66	2,76	6,47	3,17	13,84	8,37
9	11,36	15,81	7,99	7,04	3,68	4,83	2,25	8,45	5,90	21,92	10,76
17	4,17	10,22	6,28	4,62	2,37	2,29	3,27	12,53	8,51	31,71	14,04
25	2,22	6,48	4,30	3,21	1,43	2,16	3,11	4,71	15,75	37,94	18,68
Фракция -2,5 + 1,6 мм											
0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	67,80	15,16	4,79	2,85	1,21	1,49	0,75	1,01	1,76	1,9	1,28
2	55,97	19,77	6,43	3,73	1,69	2,59	0,76	2,39	2,21	3,48	0,99
3	48,67	19,7	6,60	4,4	1,93	2,68	1,52	6,07	3,03	3,68	1,75
4	35,87	20,79	7,3	4,95	2,37	3,38	1,75	3,07	3,24	14,92	2,37
5	32,71	21,87	8,42	5,68	2,98	3,67	1,88	4,17	5,19	11,92	1,52
7	29,30	20,75	8,01	5,39	2,65	2,93	1,53	3,22	4,53	18,30	3,36
9	20,97	20,1	8,11	6,06	3,15	4,56	1,85	5,7	7,48	21,27	0,75
13	10,36	15,91	6,99	5,46	2,70	3,89	1,85	3,39	5,40	35,71	8,33
Фракция -1,0 + 0,63 мм											
0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	62,18	14,42	3,51	3,54	1,39	2,25	1,97	3,41	2,52
2	0	0	48,70	16,73	4,79	4,79	2,22	4,26	4,50	4,33	2,04
4	0	0	39,86	14,84	4,90	4,90	2,08	3,72	5,81	7,12	2,85
6	0	0	28,40	14,54	4,98	5,06	1,90	3,82	5,61	14,28	5,59
10	0	0	22,33	2,54	4,28	4,94	2,64	9,11	9,95	13,29	3,67
14	0	0	10,15	3,98	5,27	4,89	3,10	10,26	9,34	13,67	4,43
18	0	0	3,66	10,40	3,23	3,53	1,61	5,59	9,28	23,23	2,06
Фракция -0,315 + 0,2 мм											
0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	7,77	16,91	30,39	15,06	19,07	10,81
3	0	0	0	0	0	7,36	9,35	29,88	12,13	31,39	9,90
5	0	0	0	0	0	6,99	10,21	27,45	14,30	31,54	9,51
9	0	0	0	0	0	6,40	11,43	24,71	16,66	27,89	12,90
13	0	0	0	0	0	2,52	11,16	18,81	18,92	33,01	15,58

остатки выбранных фракций в смеси, т.е. $\gamma_{смесь\ фр}^i = \gamma_1 R_1^i + \gamma_2 R_2^i + \gamma_3 R_3^i$, где R_j^i – остаток j фракции на i сите, γ_j – выход j фракции в гранулометрическом составе исходного продукта. Таким образом, производилось моделирование процесса совместного измельчения фракций крупности.

На рис. 2.15 представлены кинетика измельчения исходного материала (1) и смоделированной смеси (2), вычисленной по результатам измельчения отдельных фракций.

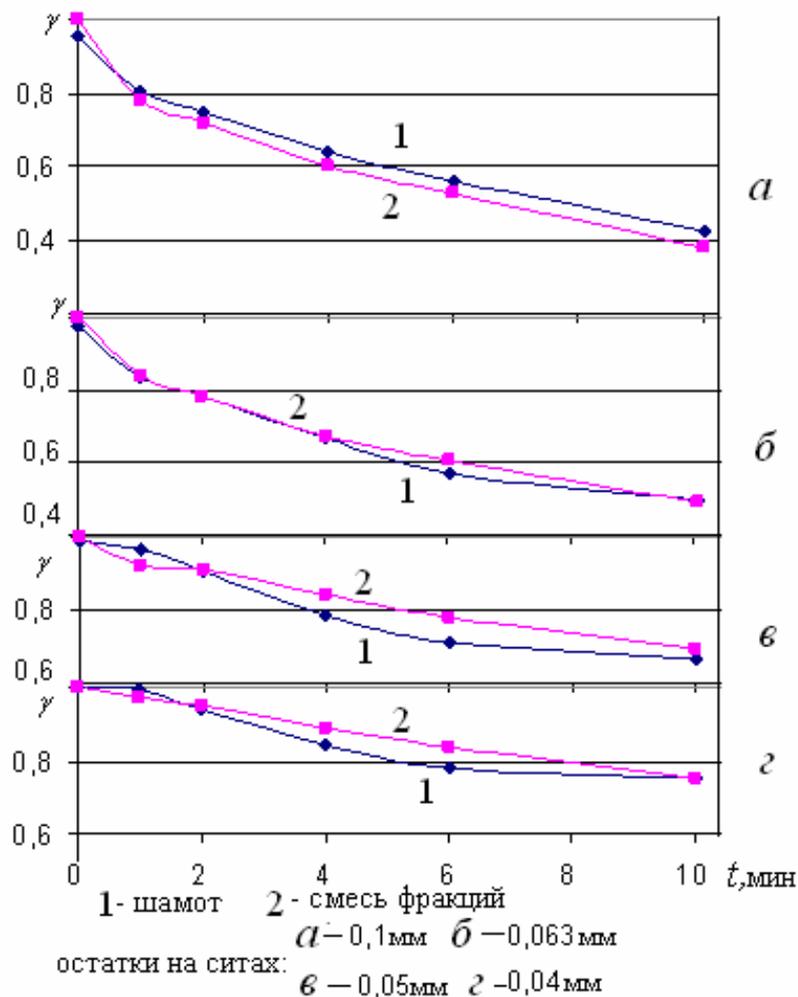


Рисунок 2.15 – Кинетика измельчения исходного шамота (1) и смоделированной смеси фракций шамота (2).

Практическое совпадение характера кинетических кривых подтверждает выдвинутую гипотезу о закономерности независимого измельчения фракций

крупности при их совместном измельчении в смеси.

Результаты сравнения кинетики измельчения отдельных узких фракций и исходного шамота позволяют говорить о сохранении закономерности независимой кинетики измельчения каждой узкой фракции в смеси. Таким образом, каждая узкая фракция крупности твердых полезных ископаемых в смеси измельчается независимо от соотношения других фракций крупности в мельнице, что составляет второе научное положение работы.

2.5 Установление кинетических уравнений связи грансостава и дисперсности измельчения

При исследовании закономерностей тонкого измельчения обычно используется интегральный подход, т.е. рассматривается кинетика измельчения остатка на контрольном сите. В этих случаях применяются классические уравнения [1] и их модификации, введенные Товаровым, Разумовым и др. [2]. Однако при таком подходе трудно получить информацию о поведении узких классов крупности, что крайне важно при анализе раскрытия ценного компонента и определении рациональных режимов измельчения, исключении переизмельчения и излишнего ошламования. Необходимость учета вклада всех классов крупности измельченного материала при оценке энергетической эффективности измельчения отмечалась в работах Малярова П.В. и других авторов [3]. Для этого вводился термин «индекса измельчаемости» [59], представляющий собой отношение количества вновь образованной поверхности к затраченной на ее образование энергии.

В мировой практике обогащения в последнее время для оценки кинетики узких классов используется матричная модель процесса с вычислением селективной и распределительных матриц измельчения [60]. Однако в этих случаях надо учитывать конкретный вид измельчительной установки и особенности схемы замкнутого цикла измельчения.

Главная цель любого измельчения – получение продукта нужного

класса крупности или дисперсности. В зависимости от задач измельчения требуемая дисперсность определялась либо гранулометрическим составом, остатками на контрольных ситах, либо вновь образованной удельной поверхностью.

Нами предлагается комплексный подход к анализу кинетики процесса измельчения, учитывающий кинетику вновь образованной удельной поверхности и позволяющий определить закономерности сокращения крупности в узких классах крупности.

Исследования процесса тонкого измельчения в мельницах разного типа показали возможность описания его на основе оценивания математического ожидания (Mx) и стандартного отклонения σ гранулометрического состава материала вида:

$$\begin{cases} Mx = a_1 t^2 - a_2 t + a_3 \\ \sigma = b_1 t^2 - b_2 t + b_3 \end{cases}, \quad (2.9)$$

при этом,

$$Mx(t) = \sum_{i=1}^N (\gamma_i \bar{d}_i), \quad (2.10)$$

где t – время измельчения, γ_i, \bar{d}_i – выход класса крупности материала, % и средний диаметр частиц этого класса, соответственно, N – число рассматриваемых классов согласно ситовому анализу.

Коэффициенты a_i, b_i зависят от материала и вида мельницы. В частности, для измельчения различных материалов в струйной, шаровой и стержневой мельницах коэффициенты показаны в таблице 2.6.

Анализ установленных зависимостей кинетики классов крупности при струйном измельчении материалов разной плотности показал подобный характер кривых $Mx = f(t)$ и $\sigma = f(t)$ – убывающие кривые с вогнутостью вниз. На начальном этапе измельчения коэффициенты уравнений и, соответственно, вид кривых зависят от крупности исходного материала.

Коэффициенты уравнений кинетики классов крупности

№	мельница	руда	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3
1	шаровая	медно-никелевая	0,0045	-0,24	3,69	0,0002	-0,038	2,35
2	стержневая	медно-никелевая	0,085	-1,11	3,84	0,038	-0,58	2,5
3	струйная	шамот	0,001	-0,06	1,07	0,00001	-0,017	0,83
4	струйная	шлак	0,023	-0,26	0,88	0,008	-0,13	0,71
5	струйная	кварц	0,006	-0,07	0,265	0,0003	-0,015	0,11

Так, исходный шамот и шлак включал частицы размером менее 2,5 мм, кварцевый песок – менее 0,63 мм. Графики зависимостей, определяющих уравнения кинетики струйного измельчения материалов, представлены на рис.2.16.

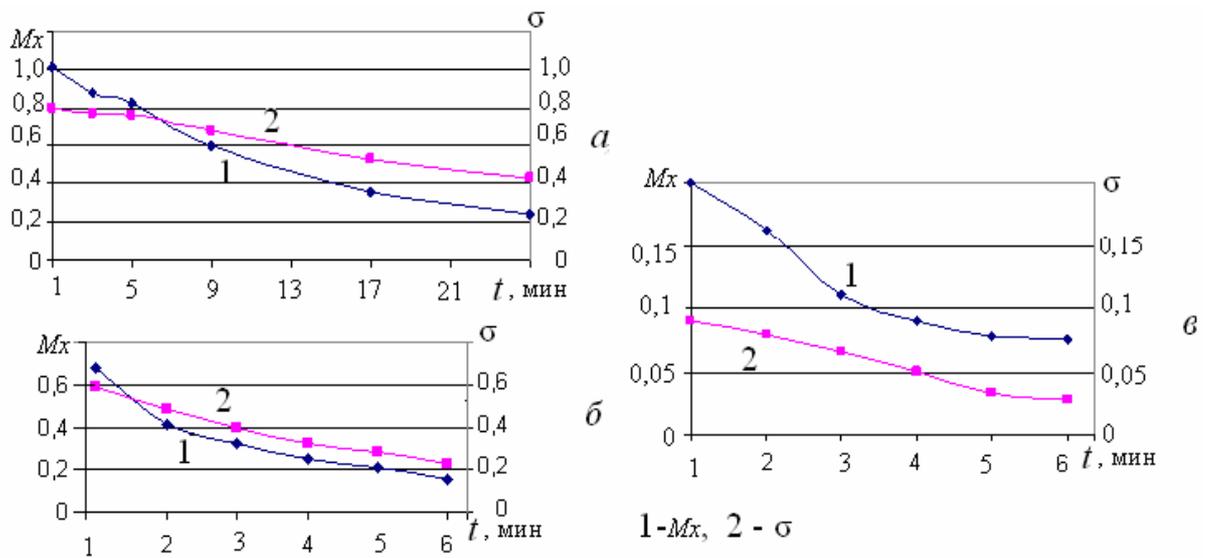


Рисунок 2.16 – Кривые кинетики классов крупности при струйном измельчении шамота (а), шлака (б) и кварцевого песка (в).

Для исследования кинетики измельчения руд в барабанных мельницах, рассматривался процесс измельчения полиметаллической руды месторождения Кутесай 2 в шаровой мельнице [61] и бедной медно-никелевой руды в шаровой и стержневой мельнице [62]. Исходный гранулометрический состав

бедной медно-никелевой руды и его кинетика при измельчении в шаровой и стержневой мельницах представлены в табл.3 Приложения А и в [62]. Коэффициенты уравнений кинетики гранулометрического состава этих руд представлены в табл. 2.7. Графическое представление уравнений кинетики классов крупности при измельчении этих материалов показано на рис. 2.17. Характер кривых подобен кривым, отражающим кинетику струйного измельчения.

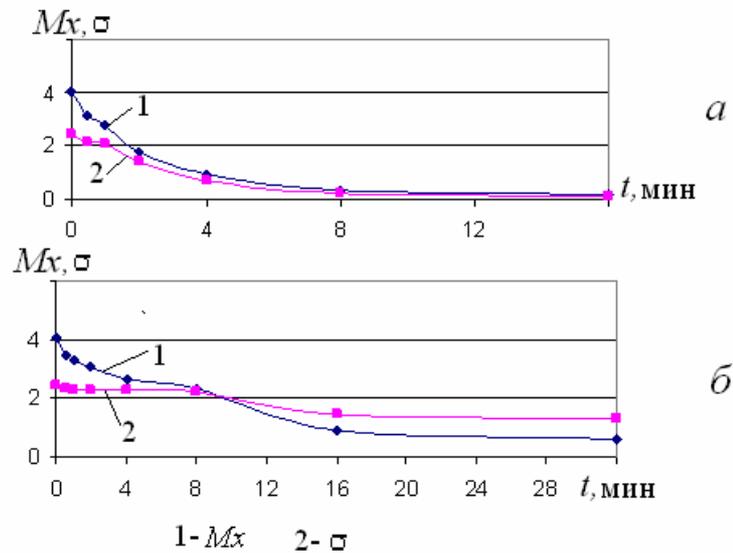


Рисунок 2.17 – Кривые уравнения кинетики измельчения бедной медно-никелевой руды в стержневой (а) и шаровой (б) мельницах

Коэффициенты уравнений кинетики тонкого измельчения зависят от относительной крупности продукта, т.е. от величины эффективности измельчения, названной нами по аналогии термина эффективности грохочения. Эффективность измельчения – это отношение, выраженное в долях единицы (или процентах), массы требуемого класса крупности (в промышленности обычно 72 или 45 мкм) к массе самого крупного класса в исходном материале. Установлено, что если величина эффективности измельчения $E_u = M_{\text{контр}} / M_{\text{исх}}^{\text{max}} > 0,5$, то процесс измельчения не завершен, и кривые зависимости стандартного отклонения от времени измельчения имеют выпуклость вверх, т.е. в отличие от аналогичной зависимости для завершенного

измельчения коэффициенты b_1 b_2 имеют противоположные знаки, а именно $b_1 < 0$, $b_2 > 0$. В табл. 2.7 показаны коэффициенты уравнений для недоизмельченного материала в струйной мельнице. Этот же результат наблюдается при анализе кинетики классов крупности полиметаллической руды при измельчении в шаровой мельнице.

Полиметаллическая руда месторождения Кутесай 2 (Кыргызстан) является трудноизмельчаемой, комплексной, образованной тремя типами оруднения: редкоземельного, циркониевого, ториевого и полиметаллического. Продукт измельчения полиметаллической руды в шаровой мельнице довольно крупный, процесс измельчения не завершен. В связи с этим кривая зависимости изменения во времени стандартного отклонения гранулометрического состава имеет другой вид – возрастающая функция с отрицательной кривизной (т.е. выпуклостью вверх, см. рис. 2.18) и коэффициенты имеют соответствующие знаки (см. табл. 2.7)

Таблица 2.7

Коэффициенты уравнений кинетики гранулометрического состава
недоизмельченных материалов

№	мельница	руда	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3
1	струйная	шамот	0,0045	-0,103	1,174	-0,003	0,015	0,75
2	струйная	кварц	0,005	-0,064	0,26	-0,004	0,009	0,08
3	шаровая	полиметаллическая	0,0002	-0,021	1,98	-0,0002	0,02	0,4

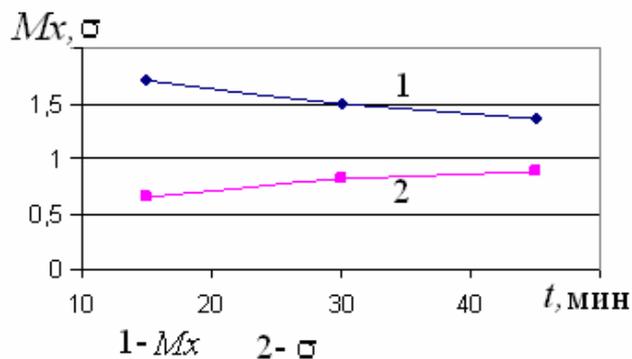


Рисунок 2.18 – Кривые уравнения кинетики измельчения полиметаллических руд в шаровой мельнице.

При исследовании кинетики измельчения различных материалов в трех видах мельниц установлено, что при завершении измельчения, т.е. при достижении необходимой крупности продукта измельчения, коэффициенты уравнения зависимости $\sigma(t)$ имеют разные по значению, но одинаковые по знаку значения: $b_1 > 0$, $b_2 < 0$, $b_3 > 0$ (см. табл. 2.6). Таким образом, определяя в ходе измельчения уравнение стандартного отклонения изменения гранулометрического состава измельчаемого материала, можно говорить об окончании процесса измельчения или его незавершенности при заданном классе крупности продукта.

Наряду с гранулометрическим составом важной характеристикой дисперсности является вновь образованная удельная поверхность материала, равная отношению площади боковой поверхности твердых частиц к их объему или массе. Существует несколько способов вычисления удельной поверхности материала при измельчении. В дальнейшем будем использовать следующую формулу:

$$S = k_s \sum_{i=1}^N \frac{\gamma_i}{\bar{d}_i}, \quad (2.11)$$

где k_s – коэффициент поверхности частиц, учитывающий отличие площади боковой поверхности измельченных частиц от площади соответствующих сферических частиц, равновеликих им по объему γ_i, \bar{d}_i – выход класса крупности материала, % и средний диаметр частиц этого класса, соответственно, N – число рассматриваемых классов согласно ситовому анализу.

Учитывая выражение для математического ожидания распределения гранулометрического состава материала (2.10), получаем выражение для удельной вновь образованной поверхности в виде:

$$S = k_s M \frac{1}{x}(t). \quad (2.12)$$

Величина k_s определена на основе экспериментальных измельчений материалов различных по плотности, гранулометрическому составу и форме частиц. Анализ полученных результатов исследований позволил сделать сле-

дующие выводы.

– для тонкого измельчения при определении величины коэффициента k_s необходимо учитывать вклад классов мелких частиц (менее 40 мкм). Это позволит уменьшить погрешности расчетов, т.к. при учете только классов +40 мкм величина коэффициента возрастает на порядок;

– коэффициент поверхности k_s можно представить как коэффициент формы, умноженный на поправочный коэффициент k_s^* , показывающий различие вычисленной удельной поверхности по гранулометрическому составу материала с учетом классов более 1,0 мкм и определенной удельной поверхности на приборах «Malvern», «Maltisizer» и т.д.

Как показали вычисления поверхности фигур различной формы (см. Приложение Б), минимальной удельной поверхностью обладает шар, для которого $k_s^V = 6$. Поэтому при дальнейших рассуждениях считаем, что форма частиц приближается к шару, и коэффициент поверхности вычисляется по формуле $k_s = k_s^V k_s^*$

Исследования формы частиц, измельченных в мельницах различного типа, показали зависимость коэффициента поверхности от вида измельчения. Так, для измельчения железистых кварцитов в шаровой мельнице [64] определена величина коэффициента поверхности как $k_s = 6 * 1,75 = 10,5$.

При исследовании цирконового концентрата (содержание $ZrO_2 = 65...67,2\%$) [31] сравнивались продукты измельчения в обычной шаровой, планетарной и струйной мельницах. Изучение формы разрушенных частиц показало, что при сильном динамическом нагружении четко выражены поверхности скола, острые ребра, удлиненная форма частиц: коэффициент формы $k_s = 0,4...0,5$ (для шара $k_s = 1$), тогда как при раздавливании или истирании в слабом динамическом режиме их форма ближе к изометричной, округлой ($k_s = 0,7...0,8$).

В таблице 2.8 приведены результаты анализа гранулометрических со-

ставов тонкодисперсных продуктов струйного измельчения и результаты вычисления коэффициента k_s^* с использованием аппарата «Malvern».

Таблица 2.8

Результаты анализа продуктов струйного измельчения прибором «Malvern».

материал	$S_{\text{уд}}, \text{см}^2/\text{г}$	$\rho, \text{г}/\text{см}^3$	$M_x, \text{см}^{-1}$	$S_{\text{выч}}, \text{см}^2/\text{г}$	k_s
циркон	1560	4,7	1254,11	266,83	5,85
	1310		1046,63	222,69	5,88
	1240		988,12	210,24	5,9
	1230		987,88	210,19	5,85
	1220		976,14	207,69	5,87
	1180		941,47	200,31	5,89
	1170		938,62	199,71	5,86
	1080		869,03	184,9	5,84
	шлак		6198	3	2140,33
5310		1648,31	549,44		9,66
4262		1270,14	423,38		10,07
3899		2263,33	754,44		5,17
3665		2401,33	800,44		4,58
2093		1583,67	527,89		3,97
Алмазный порошок		565	3,55		330,49
	28920	17988,03		5067,05	5,71
Кварцевый песок	4600	2,65	1188,67	448,55	10,26
	7500		1872,13	706,47	10,62
	6200		1591,93	600,73	10,32
	5670		1480,4	558,64	10,15
	6700		1747,5	659,44	10,16
	5670		1468,38	554,11	10,23
	2710		1287,52	485,86	5,58
Диоксид циркония ZrO_2	5712	6,5	5233,52	805,16	7,09

Установлено, что коэффициент поверхности k_s зависит от плотности, удельной поверхности материала. По экспериментальным данным зависимость коэффициента k_s от плотности можно выразить в виде:

2.5 Кинетика измельчения классов крупности в различных технологиях измельчения

Анализ скорости измельчения различных материалов является актуальной проблемой, возникающей во многих отраслях промышленности. Это связано с главной задачей процесса измельчения – не переизмельчить более требуемого класса крупности, с одной стороны, и с необходимостью снижения энергоемкости производства, с другой стороны

Исследования скорости измельчения материалов основывались на анализе изменений гранулометрического состава измельчаемого материала, т. е. кинетике измельчения, с использованием установленных нами уравнений кинетики (2.9).

Для струйного измельчения шлака, кинетика измельчения которого показана в таблице 2.9, уравнения имеют вид:

$$\begin{aligned} Mx &= 0,023t^2 - 0,26t + 0,88 \quad (R = 0,985) \\ \sigma &= 0,008t^2 - 0,13t + 0,7 \quad (R = 0,999), \end{aligned} \quad (2.14)$$

В таблице представлены результаты выхода продукта (остатки на сите) в процентах по классам крупности $+\alpha$, т. е. крупности продукта более α .

Таблица 2.9

Показатели кинетики измельчения шлака (по остатку на сите,%)
в струйной лабораторной мельнице

<i>t</i> , мин	Классы крупности, мм; выход %										
	+1,6	+1	+0,63	+0,4	+0,3	+0,2	+0,16	+0,1	+0,06	+0,05	-0,05
0	9,62	16,8	17,58	12,97	10,26	6,44	6,82	4,76	5,2	4,98	4,5
1	8,33	18,2	15,15	13,72	7,32	10,1	5,08	8,86	4,38	7,09	1,8
2	3,23	9,44	9,59	9,42	5,43	8,63	6,16	21,82	9,29	12,59	4,4
3	1,07	7,0	8,10	8,56	5,03	8,43	6,62	21,03	11,7	18,39	4,1
4	0,47	4,36	5,95	6,27	3,91	6,69	5,23	22,67	18,53	23,53	2,4
5	0,00	3,49	5,36	4,99	2,99	6,23	3,89	21,31	25,42	23,08	3,2

Рассматривались также результаты измельчения полиметаллической руды в шаровой мельнице и бедных медно- никелевых руд в стержневой и шаровой мельнице. Анализ кинетики измельчения одинакового сырья в разных мельницах (шаровой и стержневой) показал зависимость кинетики и скорости измельчения от вида мельницы, т. е. от способа разрушения. Скорость измельчения узких фракций определялось по одной и той же методике:

$$v_{ni} = \frac{\Delta \gamma_i}{\Delta t} = (\gamma_i - \gamma_{i+1}) / \Delta t, \quad (2.15)$$

где v_{ni} - скорость измельчения анализируемой фракции, γ_i, γ_{i+1} - содержание фракции (%) на данном и последующем шаге измельчения, Δt - длительность шага измельчения.

На рис. 2.20 – 2.22 показаны скорости измельчения в струйной, мельнице фракций крупных, средних и мелких по размеру частиц шлака и кварцевого песка. Установлено, что скорость измельчения для крупных фракций имеет убывающий характер, эти фракции разрушаются на начальном этапе измельчения и выбывают из процесса.

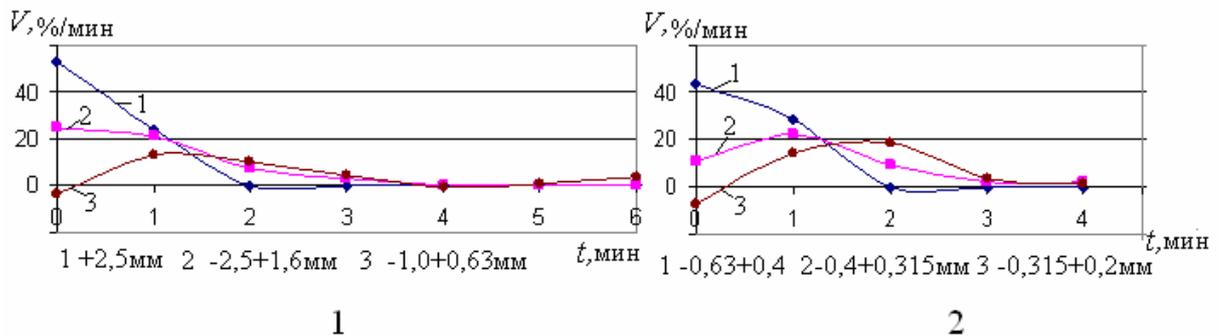


Рисунок 2.20 – Скорости измельчения крупных узких фракций шлака (1) и кварцевого песка (2) в струйной мельнице.

Для средних и мелких фракций кривые скорости имеют знакопеременный характер, что можно объяснить работой струйной мельницы в замкнутом цикле с периодическим добавлением недоизмельченного материала в зону помола.

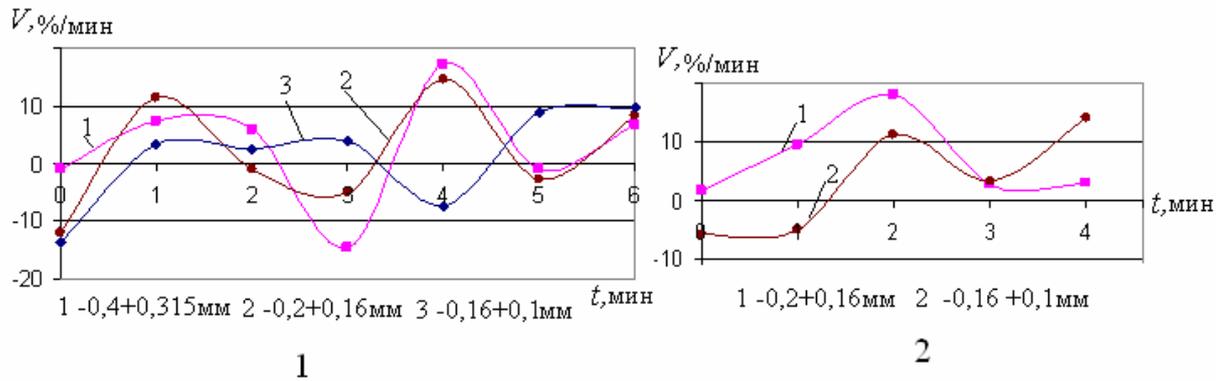


Рисунок 2.21 – Скорости измельчения средних узких фракций шлама (1) и кварцевого песка (2) в струйной мельнице.

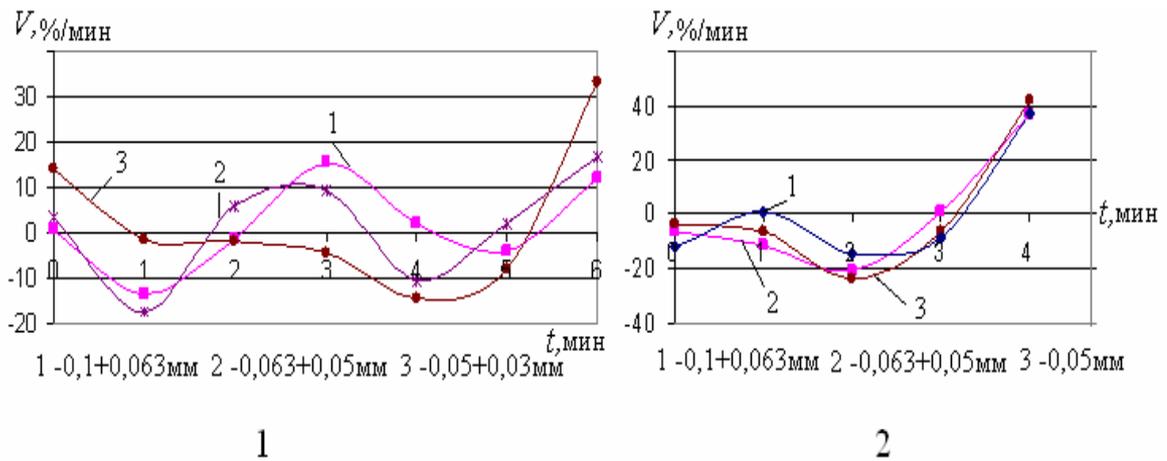


Рисунок 2.22 – Скорости убывания мелких узких классов шлама (1) и кварцевого песка (2) в струйной мельнице.

При стержневом и шаровом измельчении (см. рис. 2.23-2.25) скорости убывания крупных фракций имеют также убывающий характер, однако в стержневой мельнице крупные частицы первых двух рассматриваемых классов исчезают интенсивнее (около четырех минут).

В шаровой мельнице этот процесс растягивается до 12 мин. В остальных классах скорости убывания имеют отрицательное значение, что обозначает накопление массы фракций в начальный период.

На следующем этапе в стержневой мельнице средние по крупности классы начинают интенсивно измельчаться и со второй минуты скорость убывания класса $(-2,0 + 1,6 \text{ мм}) \dots (-1,0 + 0,63)$ приобретает знакопеременный ха-

рактир, увеличиваясь до 7 %/мин на четвертой минуте, а затем убывает до полного исчезновения класса.

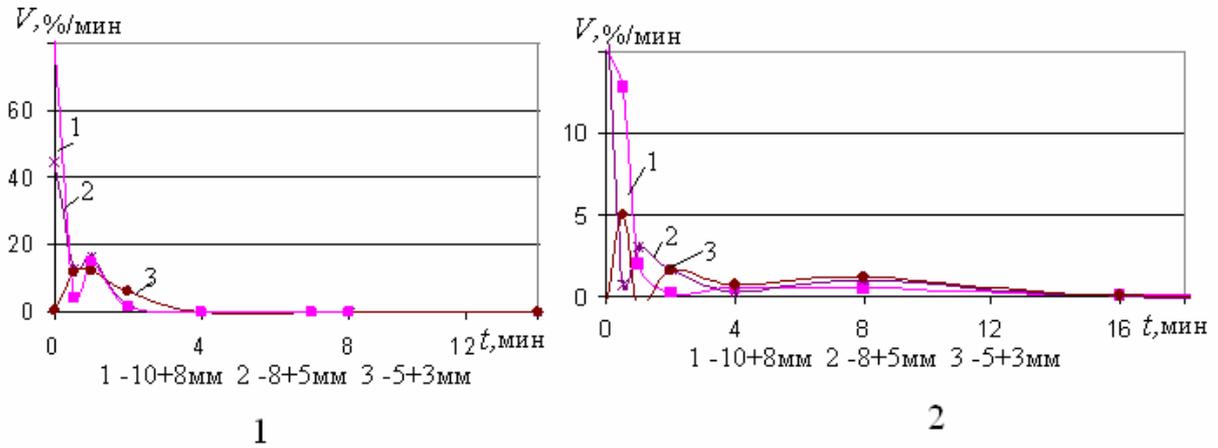


Рисунок 2.23 – Скорости убывания крупных классов бедной медно-никелевой руды в стержневой (1) и шаровой (2) мельницах.

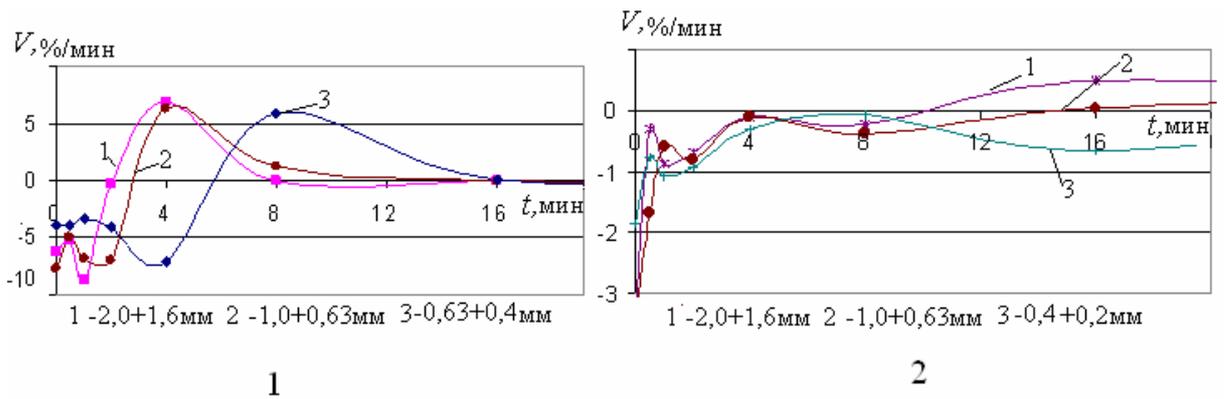


Рисунок 2.24 – Скорости убывания средних классов бедной медно-никелевой руды в стержневой (1) и шаровой (2) мельницах.

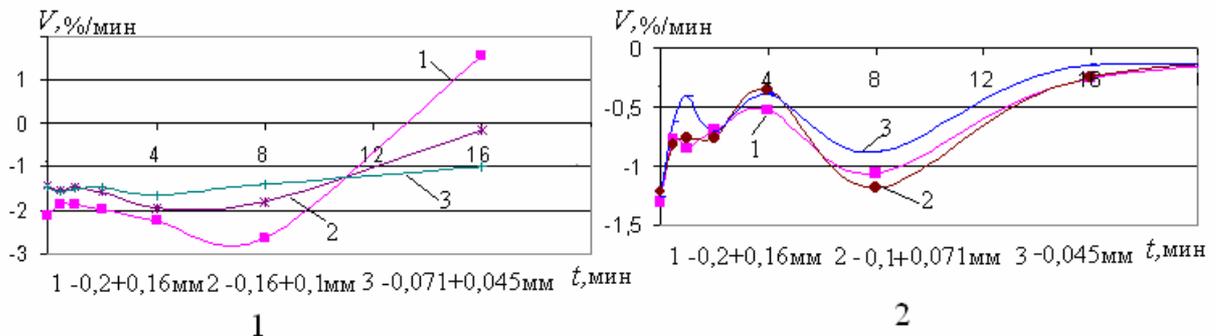


Рисунок 2.25 – Скорости убывания мелких классов бедной медно-никелевой руды в стержневой (1) и шаровой (2) мельницах.

В тоже время при шаровом измельчении процесс убывания средних классов происходит медленнее, имея также знакопеременный характер. Так, до восьмой минуты упомянутые выше средние фракции обладают отрицательной скоростью убывания, только после 10-12 минуты скорости становятся положительными и медленно растут.

Для мелких класса в стержневой мельнице характерна отрицательная скорость убывания, т. е. для них преобладает процесс накопления вплоть до момента исчезновения средних классов (12 – 16 мин). Потом частицы мелких классов начинают измельчаться, за исключением двух последних класса (частицы размером + 0,01), которые сохраняют накопительный характер, преобладающий над измельчением.

Для шарового измельчения на среднем и заключительном этапе измельчения характерно преобладание накопительного процесса в средних и мелких фракциях. Имея знакопеременные кривые скоростей измельчения, частицы класса до -0,1 имеют отрицательную скорость измельчения до 16 минут. Процесс измельчения происходит только за счет остатков крупных классов и средней фракции (+2,0 – 1,6). Только во второй половине процесса измельчения, т. е. после 64 минуты (см. Приложение А, табл. А 2) начинают измельчаться средние классы, при этом мелкие фракции так и не включаются в измельчение.

Таким образом, анализ скорости убывания узких классов бедной медно-никелевой руды в стержневой и шаровой мельницах показал преимущества стержневой мельницы для получения продукта дисперсностью менее 2,0 мм. Однако измельчение в стержневой мельнице более энергоемкое, поэтому возможно комбинировать использование двух мельниц: вначале стержневую для получения 90 % продукта крупностью менее 2,0 мм, потом для получения продукта менее 0,071 мм подключать шаровую мельницу [62]. Учитывая возможности струйной мельницы, можно рассмотреть включение в замкнутый цикл измельчения [63] струйной мельницы на третьем этапе для измельчения продукта менее 0,63 мм.

В этом случае скорость убывания классов крупности при струйном измельчении достигает 10 % / мин, тогда как при стержневом измельчении – 5 % / мин, а шаровом – до 0,5 % / мин. Эти все выводы надо проверять для каждого материала отдельно.

2.6 Разработка алгоритма управления удельной поверхностью продукта на основе функции распределения дисперсности

Математическое описание дисперсности измельченного материала имеет два аспекта. Первый состоит в том, что применяемая функция должна наиболее точно отображать данные гранулометрического состава – выход классов крупности в зависимости от их крупности. Этого можно достичь, например, путем подбора уравнения линии тренда, либо путем кусочно-линейной аппроксимацией описания функции распределения с применением квадратичного сплайна [67].

С другой стороны кривые распределения и суммарные характеристики крупности полностью характеризуют гранулометрический состав материала с точки зрения формального его описания, но не позволяют выявить закономерности формирования дисперсности во времени при измельчении. Необходим такой способ представления гранулометрического состава, который бы включал минимальное количество характерных для дисперсии параметров, был бы прост, удобен и имел достаточную точность для инженерных расчетов.

В практике обогащения полезных ископаемых в основном используются суммарные (кумулятивные) характеристики крупности. Они представляют собой зависимость суммарного выхода класса крупности менее или более заданного размера частиц ($y_{<x}(x)$, $y_{>x}(x)$). Однако, большую информацию о характеристики дисперсности дает распределение частного выхода классов крупности, но более логичной для анализа дисперсности является функция распределения $\varphi(x)$, представляющая зависимость частотности частиц от их

размера [63].

Исходя из физического смысла функции распределения, можно вычислить как частный выход любого класса крупности, так и любого суммарного класса:

$$y_{x_1-x_2} = \int_{x_1}^{x_2} \varphi(x) dx; \quad (2.16)$$

$$y_{<x} = \int_0^x \varphi(x) dx. \quad (2.17)$$

Удельная поверхность измельченного продукта:

$$s = k_s \int_0^{x_{\max}} \frac{\varphi(x)}{x} dx, \quad (2.18)$$

где k_s - коэффициент, учитывающий отклонение формы частиц от сферической, в частности, для продуктов измельчения руд $k_s = 10,5$ [64].

Функция распределения частиц по крупности $\varphi(x)$ определяется механизмом разрушения и технологией измельчения. При значительном содержании в циркулирующей нагрузке частиц крупностью менее заданной, происходит их повторное измельчение, приводящее к непродуктивному увеличению поверхности частиц, дополнительным энергозатратам.

На рис. 2.26 приведена графическая иллюстрация функций распределения частиц в продуктах измельчения с одинаковой максимальной крупностью, но с различной степенью измельчения мелких частиц. Кривая 1 характерна для более переизмельченного продукта по сравнению с продуктом, характеристика которого представлена кривой 2.

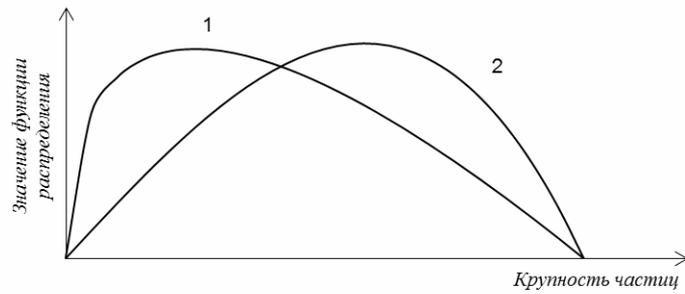


Рисунок 2.26 – Распределение частиц по крупности для продуктов различной дисперсности.

На рис. 2.27 представлены суммарные характеристики крупности продуктов, функции распределения которых показаны на рис. 2.26

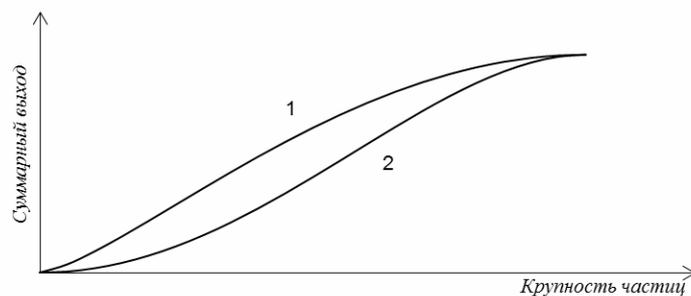


Рисунок 2.27 – Суммарные характеристики крупности продуктов Измельчения.

Из приведенных графиков следует, что продукт, характеризуемый кривой 1, содержит больше мелких фракций, т.е. он в большей мере переизмельчен, например, ввиду поступления в мельницу с циркулирующей нагрузкой частиц крупностью менее заданной.

Учитывая изложенные выше сложности при описании замкнутых циклов измельчения, предлагается упрощенная модель. Сущность этой модели состоит в том, что процесс измельчения рассматривается как превращение класса крупностью более расчетного в мелкий класс. При этом часть энергии, подводимой к измельчаемому материалу, продуктивно расходуется именно на это превра-

шение. Другая часть энергии расходуется на переизмельчение уже готового продукта. Пропорции между этими энергозатратами устанавливаются содержанием расчетного класса в питании мельницы θ , т. е. продуктивные затраты энергии пропорциональны $1-\theta$.

Исходя из уравнения (2.18) функцию распределения можно вычислить, если известна зависимость суммарного выхода от крупности:

$$\varphi(x) = \frac{dy(x)}{dx}. \quad (2.19)$$

Известны различные уравнения гранулометрических характеристик [1, 2, 13], полученные при конкретных допущениях и обладающих своими положительными свойствами и недостатками.

При исследовании гранулометрического состава продуктов дробления и измельчения широко используется уравнение Годэна-Андреева [1] для суммарной характеристики по содержанию класса крупности менее x в виде

$$y = Ax^k. \quad (2.20)$$

Значение показателя k определяет направление и степень изгиба кривой характеристики. Если характеристику построить по содержанию класса крупности более x , то при $k > 1$ она будет обладать отрицательной кривизной, при $k < 1$ – положительной кривизной, а при $k = 1$ – характеристика будет прямой линией. Таким образом, по значению показателя k можно лишь качественно судить о преобладании в материале крупных или мелких зерен.

Обработка большого количества гранулометрических составов продуктов дробления и измельчения показала, что во многих случаях лучшее соответствие экспериментальным данным дает экспоненциально-степенное уравнение Розина-Раммлера-Беннета (в зарубежной литературе – уравнение RRB) [4]:

$$R = 100e^{-bx^n}, \quad (2.21)$$

где R – суммарный остаток на контрольном сите или суммарный выход класса $> x$, %; x – крупность; b и n – параметры, зависящие от свойств материала и размерности x .

Уравнение RRB для суммарной характеристики крупности по содержанию частиц крупностью $< x$ имеет вид:

$$y = 1 - R = 1 - e^{-bx^n}, \quad (2.22)$$

где y – суммарный выход класса менее x , доли единицы.

Уравнение RRB охватывает опытные данные широкого диапазона крупности, но оно не удовлетворяет одному конечному условию – нулевой выход классов достигается только при бесконечно большой крупности материала, т. е. $R = 0$ при $x = \infty$. При нулевой крупности первая производная отлична от нуля, что не позволяет вычислить удельную поверхность. В расчетах необходимо этот факт учитывать и принимать конечную крупность материала, соответствующую некоторому значению выхода класса, например, остаток на сите 5% [4]. Сливы классификаторов шаровых мельниц, работающих в замкнутом цикле, большей частью удовлетворяют уравнению RRB (2.22) при $n = 1$.

Приведенные уравнения характеристики крупности широко известны в практике обогащения полезных ископаемых и позволяют решать ряд задач, например, определять число зерен (частиц) в любом классе крупности, поверхность зерен, удельную поверхность. Однако эти вычисления можно осуществить при некоторых допущениях, которые, на наш взгляд, являются недостаточно корректными, что приводит к отличию расчетных и экспериментальных данных.

Некорректность допущений состоит в следующем:

– недостаточно обоснована предельная минимальная крупность частиц

от $(5-10) \cdot 10^{-7}$ мкм до 0,1-1 мкм;

– форма частиц принимается кубической или сферической, поправка на форму частиц для различных материалов не учитывается;

– максимальная крупность частиц при вычислениях по уравнению RRB принимается условно.

При этих допущениях поверхность частиц узкого класса крупности вычисляется через уравнение кривой распределения $y = f(x)$ при условии, что

частицы имеют шарообразную форму, как $dS = \frac{6}{\delta} \frac{dy}{dx}$, где δ – плотность ма-

териала. Используя уравнение RRB (2.22), можно получить выражение для общей удельной поверхности частиц в классе – $x_2 + x_1$ [4]:

$$S_{x_2-x_1} = \frac{6 \cdot 10^4}{\delta} nb \int_{x_1}^{x_2} x^{n-2} e^{-bx^n} dx. \quad (2.23)$$

Для суммарной характеристики крупности можно использовать уравнение Годэна-Андреева (1) в виде

$$y = x^k / x_m^k, \quad (2.24)$$

где x_m – максимальный размер частиц. В этом случае общая удельная поверхность частиц в классе ($-x_m + x_1$) вычисляется:

$$S_{x_m-x_1} = \frac{6 \cdot 10^4 k}{\delta x_m^k} \int_{x_1}^{x_m} x^{k-2} dx = \frac{6 \cdot 10^4 k}{\delta x_m^k (k-1)} (x_m^{k-1} - x_1^{k-1}). \quad (2.25)$$

Гилварри [68] провел теоретический анализ разрушения одиночных частиц. Было показано, что массовая или объемная доля материала, размер частиц которого $< x$, можно представить в виде:

$$y = 1 - \exp(-(\lambda x) - (\lambda_s x)^2 - (\lambda_v x)^3), \quad (2.26)$$

где $\lambda, \lambda_s, \lambda_v$ – параметры, характеризующие плотность соответственно реберных, поверхностных и объемных активированных трещин. В частности, если при разрушении преобладают реберные трещины, то уравнение превращается в уравнение RRB в виде $y = 1 - \exp(-bx^m)$. Для малых значений x уравнение (2.22) приводит к распределению Годэна–Шумана $y = (x/k)^\alpha$. Таким образом, применение формулы Гилварри (3.29) требует знания плотности активированных трещин, что в общем случае делает невозможным расчеты. Этим же отличается формула, выведенная Годэном и Мелой [65] для распределения продуктов ударного разрушения, требующая оценивания числа микротрещин, пересекающих единицу длины линейного отрезка, $e = 1 - (1 - x/x_0)^r$, где r, x_0 – параметры, характеризующие количество трещин в кристалле и размер исходного образца.

Для определения распределений по крупности предложено множество формул, но многие из них вытекают как частный случай самого общего представления, выведенного Фагерхольтом [23] для массы частиц размером x :

$$W(x)dx = ax^m e^{-bx^n} dx, \quad (2.26)$$

где a, b, m, n – параметры.

Таким образом, указанные непрерывные функции распределения применимы только в ограниченной области полного распределения по крупности или для их использования требуется информация, которую трудно получить. Однако представление распределения частиц по крупности в обобщенном аналитическом виде дает больше информации, чем определение гранулометрического состава в каждом конкретном случае ситовым анализом.

В связи с этим актуальным и необходимым является нахождение удобной формы выражения функции распределения частиц по размерам частиц, описывающей конкретный способ измельчения.

В большинстве случаев измельченные частицы имеют неправильную

форму. Поэтому их размер в каком-либо соотношении условно заменяют диаметром шарообразной частицы. На практике широко используется средневзвешенный диаметр:

$$D = \sum \gamma d / \sum \gamma = (\gamma_1 d_1 + \gamma_2 d_2 + \dots + \gamma_n d_n) / (\gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_n), \quad (2.27)$$

где γ – выходы отдельных классов; d – средние диаметры отдельных классов.

Средний диаметр частиц узкого класса вычисляют как среднеарифметическое его пределов: $d = (d_1 + d_2) / 2$, где d_1, d_2 – верхний и нижний пределы крупности данного класса. Однако такой подход приводит часто к погрешностям.

Средний диаметр частиц $z(x)$ в интервале $(a, x) \subseteq (a, b)$ в [70] определен как математическое ожидание случайной величины при условии попадания ее в интервал (a, x) . При этом, выведена простая формула для определения среднего диаметра частиц класса в интервале (a, b) в виде $z = \frac{b - a}{\ln(b/a)}$.

Для расчетов по указанной формуле относительные погрешности более, чем в два раза ниже по сравнению с z , рассчитанным как среднее арифметическое. При этом функция распределения частиц по размерам

$\varphi = \varphi_1(x) = \frac{\gamma}{\ln(b/a)} \cdot \frac{1}{x}$, тогда как для вычисления среднего размера частиц в интервале как среднеарифметической величины равносильно условию равномерного распределения в этом интервале в виде $\varphi = \varphi_0(x) = \gamma / (b - a)$.

Естественным обобщением для приближений функции $\varphi(x)$ на отрезке (a, b) является рассмотрение ее в виде $\varphi = \varphi_\theta(x) = C \cdot x^{-\theta}$. Из условия сохранения выхода γ классов, получим

$$\varphi_{\theta}(x) = \frac{\gamma(\theta-1)a^{\theta-1}b^{\theta-1}}{b^{\theta-1}-a^{\theta-1}}x^{-\theta}, \quad (2.27)$$

тогда $z_{\theta} = \frac{(\theta-1)ab(b^{\theta-2}-a^{\theta-2})}{(\theta-2)(b^{\theta-1}-a^{\theta-1})}$. Поскольку функция $\varphi_{\theta}(x)$ на концах интервала принимает значение $C_a^{-\theta}$ и $C_b^{-\theta}$, то при условии одинакового прироста этих функций на отрезке (a,b) , приравнявая отношение функций на концах интервала (a,b) , получим $(b/a)^{2-\nu} \exp\{\alpha b^{\nu} - \alpha a^{\nu}\} = (b/a)^{\theta}$. Получаем:

$$\theta = 2 - \nu + \alpha \frac{b^{\nu} - a^{\nu}}{\ln b/a}. \quad (2.28)$$

Равенство (2.28) решает задачу о наилучшем приближении на отрезке плотности распределения $\varphi(x)$ степенными функциями. Степень θ находится в зависимости от границ интервала (a,b) и параметров α и ν . В работе [66] экспериментально определены эти параметры и выведены формулы для шламов и рядовых углей: для шламов при $\theta=2$, $z_2 = ab/z_1$, при $\theta=3$

$z_3 = \frac{2a^2}{a+b}$, для рядовых углей наилучшая степень $\theta=1,5$, при этом

$$\varphi_{1,5}(x) = \frac{0,5\sqrt{ab}}{\sqrt{b}-\sqrt{a}}x^{-1,5}.$$

Однако такой подход довольно сложный, требует знания дополнительных параметров, связанных со свойствами материалов, и предварительного определения величины θ для каждого конкретного материала.

Если задать функцию распределения дисперсности в виде

$$\varphi(x) = ax^b e^{cx}, \quad (2.29)$$

где a, b, c – параметры, связанные со свойствами материала, то удельная поверхность каждого класса крупности составляет

$$\sum s_i = k_s \int_0^D \frac{\varphi(x)}{x} dx = ak_s \sum x_i^{b-2} / c \cdot (x_i + (b-1)/c) e^{cx_i}, \quad (2.30)$$

где x_i – верхняя граница класса крупности. Удельная поверхность при этом всего измельченного продукта будет равна

$$s = k_s \int_0^D \frac{\varphi(x)}{x} dx \approx ak_s \frac{D^{b-2}}{c} (D + (b-1)/c) e^{cD}. \quad (2.31)$$

Таким образом, удельная поверхность полученного продукта зависит от средневзвешенной крупности дисперсного материала D , свойств материала, которые учитываются параметрами a, c и поверхностного коэффициента k_s , что вполне физически объяснимо. Из условия выполнения граничных условий по распределению крупности на интервале можно, задав только один параметр c , связанный со свойствами материала, вычислить остальные параметры. Но такой подход является приближенным и достаточно сложным.

Если известен гранулометрический состав, представленный суммарным выходом, то несложно при его компьютерной обработке, например, в программе *Excel*, получить уравнение линии тренда с использованием в качестве аппроксимирующей функции полином:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n. \quad (2.32)$$

В соответствии с формулой (2.19) функция распределения дисперсности будет равна:

$$\varphi(x) = a_1 + 2a_2x + 3a_3x^2 + \dots + na_nx^{n-1}. \quad (2.33)$$

Удельная поверхность в соответствии с уравнением (2.18) составит:

$$\begin{aligned}
 s &= k_s \int_0^{x_{max}} \frac{\varphi(x)}{x} dx = \int_0^{x_{max}} \left(\frac{a_1}{x} + 2a_2 + 3a_3x + \dots + na_nx^{n-2} \right) dx = \dots \\
 &\dots = \left(a_1 \ln x + 2a_2x + \frac{3}{2}a_3x^2 + \dots + \frac{n}{n-1}a_nx^{n-1} \right) \Big|_0^{x_{max}}.
 \end{aligned}
 \tag{2.34}$$

Проблема использования полученного уравнения состоит в том, что при крупности частиц, равной нулю, значение интеграла стремится к бесконечности. Это, как и в вышеописанных случаях, вызывает необходимость прибегать к надуманной минимальной крупности, а наличие коэффициентов $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ приводит эту зависимость к полипараметрической, что затрудняет выявление общих закономерностей различных дисперсий.

Указанные выше сложности можно обойти, используя предлагаемую нами форму функции распределения:

$$\varphi(x) = ax^n + bx \quad (n \neq 1), \tag{2.35}$$

где a, b, n – параметры распределения.

В простейшем случае ($n = 2$) эта зависимость графически может быть представлена кривой на рис. 2.28.

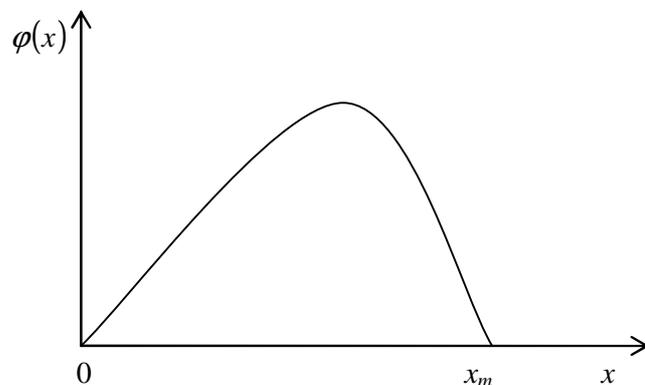


Рисунок 2.28 – Функция распределения частиц по крупности.

Распределение характеризуется наличием экстремума и значением максимального размера частиц x_m данного дисперсного состава (рис. 2.28).

Выход частиц крупностью менее x составит:

$$y = \int_0^x \varphi(x) dx = \int_0^x (ax^n + bx) dx = \frac{a}{n+1} x^{n+1} + \frac{b}{2} x^2. \quad (2.36)$$

При крупности $x = x_m$ значение функции распределения равно нулю, т.е.

$$0 = ax_m^n + bx_m,$$

откуда следует: $b = -ax_m^{n-1}$, а функция распределения примет вид:

$$\varphi(x) = a(x^n - x_m^{n-1}x), \quad (2.37)$$

и выход частиц крупностью менее x составит:

$$y = \frac{a}{n+1} x^{n+1} + \frac{ax_m^{n-1}}{2} x^2. \quad (2.38)$$

Вычислить удельную поверхность материала можно следующим образом:

$$s = k_s \int_0^{x_{\max}} \frac{\varphi(x)}{x} dx = k_s \int_0^{x_{\max}} \left(\frac{ax^n + bx}{x} \right) dx = k_s \left(\frac{a}{n} x^n + bx \right) \Big|_0^{x_{\max}} = k_s \left(\frac{a}{n} x_m^n + bx_m \right). \quad (2.39)$$

Использование граничных условий позволяет прийти к двухпараметрическому алгоритму вычисления функции распределения частиц по крупности и вычисления удельной поверхности материала. Причем, параметрами служат величины: показатель кривизны функции распределения n и максималь-

ная крупность материала x_m . Варьируя этими величинами, можно согласовать дисперсность и минимально возможную для нее удельную поверхность, что имеет первостепенное значение для управления процессом измельчения полезных ископаемых с целью снижения энергозатрат.

2.7 Описание дисперсности продуктов измельчения

Для теоретического анализа закономерностей процессов разрушения и формирования функции распределения частиц по размерам ранее использовали среднеарифметическую величину крупности класса частиц. Использование методов статистического моделирования механических смесей позволяет описывать совокупные характеристики ансамбля частиц и устанавливать связи этих характеристик с законами распределения индивидуальных свойств частиц.

Для технологических процессов измельчения порой достаточно знать среднюю величину крупности продукта классов частиц размером меньше заданной технологической величины γ или процент частиц с крупностью более той же величины γ . Это определяется на практике методами гранулометрического анализа. Наличие мельчайших частиц, размером близких к нулю, оказывает существенное влияние на процессы обогащения. Информацию об относительном выходе этих классов можно получить в результате седиментационного анализа. Однако такой анализ является чрезвычайно трудоемкой операцией и в общем случае, как правило, отсутствует. Поэтому важно определить правило вычисления распределения частиц по размерам или по крупности, что чаще встречается в предварительных процессах обогащения полезных ископаемых, т.е. разработать алгоритм определения крупности частиц во всем диапазоне их распределения при замкнутых циклах измельчения.

После первого прохода материала через мельницу и классификатор в ЗЦИ количество материала на доизмельчение (возврат) составляет:

$$q_1 = q_0(1 - \gamma_1), \quad (2.40)$$

где q_0 - количество заданного класса крупности на входе процесса измельчения,

γ - выход продукта после классификатора.

Второй проход материала включает возврат материала после классификатора и новую порцию исходного материала, т.е.

$$q_2 = q_0(1 - \gamma_1) + q_1(1 - \gamma_2) = q_0(1 - \gamma) + q_0(1 - \gamma_1)(1 - \gamma_2).$$

Аналогично после N прохода в мельницу поступает количество материала:

$$q_N = q_0 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^i (1 - \gamma_j)_i. \quad (2.41)$$

Рассмотрим выход продукта после классификатора. Пусть известна сепарационная характеристика классификатора $P(x)$ и функция распределения частиц продукта измельчения $F(x)$, т.е. кривая гранулометрического состава. Тогда выход продукта можно определить по соотношению:

$$\gamma = \int_0^{d_{\max}} P(d) f(d) dx \quad (2.42)$$

Исследования показали, что при измельчении в замкнутом цикле выход на переходном периоде не существенно изменяется, поэтому можно предположить, что $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = \dots = \gamma_n = \gamma$. Тогда последовательность многочленов в (3.46) есть геометрическая прогрессия со знаменателем $(1 - \gamma)$, сумма которой равна $S = \frac{1 - (-\gamma)^N}{\gamma}$, а ее предел при $N \rightarrow \infty$ равен

$S = \lim S = \lim \frac{1 - (-\gamma)^N}{\gamma} = 1/\gamma$. Итак, при установившемся рабочем режиме количество материала, поступающего на измельчение, составит

$$q_N = q_0 / \gamma. \quad (2.43)$$

Рассмотрим качественный состав измельченного продукта [67].

Вначале рассмотрим случай, когда интересует средне интегральные величины, в частности, средняя крупность измельченного продукта d . Из уравнения кинетики измельчения получаем:

$$d = d_0 \exp(-kt) , \quad (2.44)$$

где k – константа измельчения;

t – время измельчения;

d_0 – исходная крупность материала.

Пусть рассматривается стабильная работа мельницы с известным временем измельчения $t = t'$. Тогда после первого круга измельчения средняя крупность станет $d_1 = d_0 \exp(-kt') = d_0 A$, где $A = e^{-kt'}$ – известная величина. После второго шага имеем $d_2 = d_1 A = d_0 A^2$. Аналогично после n – шага средняя крупность будет $d_2 = d_n A^n$.

Количество выхода продукта определяется выходом γ , тогда выход всего потока материала из мельницы можно определить выходом циркулирующей нагрузки $(1 - \gamma)$. Если использовать средневзвешенную формулу, то выходная крупность мельницы определяется на втором проходе как

$$d_2 = \frac{d_0 A + d_0 A^2 (1 - \gamma)}{1 + (1 - \gamma)} .$$

Аналогично находим крупность мельницы на сле-

дующих проходах, тогда на n – шаге крупность определяется:

$$d_n = d_0 \frac{A + A^2(1-\gamma) + \dots + A^n(1-\gamma)^{n-1}}{1 + (1-\gamma) + \dots + (1-\gamma)^{n-1}} \quad (2.45)$$

Выражение (3.50) можно представить как отношение двух геометрических прогрессий, пределы сумм которых соответственно равны:

$$\lim S_1 = \lim \frac{A(A^n(1-\gamma)^n - 1)}{A(1-\gamma) - 1} = \frac{A}{1 - A(1-\gamma)},$$

$$\lim S_2 = \lim \frac{(1-\gamma)^n - 1}{(1-\gamma) - 1} = 1/\gamma.$$

Итак, крупность частиц продукта измельчения мельницы, работающей в замкнутом цикле с классификатором, будет

$$d = d_0 \frac{A\gamma}{1 - A(1-\gamma)}. \quad (2.46)$$

Приведенные выше рассуждения справедливы для учета средних значений величин. Однако если интересует выход продукта определенного мелкого класса крупности, то надо идти по другому пути.

Как известно [72], предельным законом при дроблении независимо от способа измельчения является логарифмически-нормальное распределение. Истинный закон распределения асимптотически приближается к предельному. В работе [73] изучено поведение функций, описывающих распределение частиц по крупности в разных областях ее изменения. Установлено, что эти функции подчиняются модифицированному логарифмическому нормальному распределению Колмогорова и обобщенному закону распределения Вейбулла. Определена точка соединения кривых распределения и установлена связь параметров, регулирующих характер поведения кривой распределения до и после этой точки ε .

В [70] описан метод вычисления среднего размера частиц при распределении их по крупности, основанный на физических принципах и позволяющий решать задачи измельчения и обогащения с требуемой точностью. Получение формул для эквивалентных диаметров частиц класса при моделировании процессов позволяет одновременно определить закон распределения в этом классе. Однако в этом случае не учтены особенности распределения частиц малых размеров. Далее нас будут интересовать частицы, крупность которых как угодно близка к нулю.

Найдем явные выражения для функций распределения частиц $F(x)$ и $f(x) = F'(x)$ в диапазоне крупности $0 - \varepsilon$, если известно, что $\Phi(x)$ – истинная функция распределения выражается с помощью логнормального закона.

Обозначим плотность нормального закона с параметрами $(0;1)$ через

$\varphi_H(Z)$, где $\varphi_H(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-z^2/2}$ и функцию распределения через $\Phi_H(Z)$,

где $\Phi_H(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^Z e^{-t^2/2} dt$.

Тогда при $x \rightarrow 0$ асимптотически будут выполняться равенства

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma} \varphi_H\left(\frac{1}{\sigma} \ln \frac{x}{\varepsilon}\right), \quad \Phi(x) = \Phi_H\left(\frac{1}{\sigma} \ln \frac{x}{\varepsilon}\right). \quad (2.47)$$

Обозначим выражение в скобках $t = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{x}{\varepsilon}$.

Так как $f(x) \sim x \cdot \varphi(x)$ (под знаком " \sim " будем понимать «с точностью до постоянного множителя»), то $f(x) = C \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-t^2/2}$.

Для дальнейших вычислений необходимо ввести вспомогательную функцию интервала $(a, b) \subset (0, \varepsilon)$, которую обозначим в виде

$$J_k(a, b) = \int_a^b x^{-k} f(x) dx.$$

С учетом сохранения выхода класса $0 - \varepsilon$ ($F(\varepsilon) = J_0(0, \varepsilon)$) найдем

$$\begin{aligned} J_k(a, b) &= \\ &= F(\varepsilon) \frac{\exp\left\{\frac{\sigma^2}{2}[(k-1)^2 - 1]\right\}}{\varepsilon^k \Phi_H(-\sigma)} \left[\Phi_H\left(\frac{1}{\sigma} \ln \frac{b}{\varepsilon} + \sigma(k-1)\right) - \Phi_H\left(\frac{1}{\sigma} \ln \frac{a}{\varepsilon} + \sigma(k-1)\right) \right]. \end{aligned} \quad (2.48)$$

Используя это выражение, можно получить все интересующие нас зависимости. Так, $F(x) = J_0(0, x)$, поэтому для функции весового распределения справедлива формула

$$F(x) = \frac{F(\varepsilon)}{\Phi_H(-\sigma)} \Phi_H\left(\frac{1}{\sigma} \ln \frac{x}{\varepsilon} - \sigma\right), \quad (2.49)$$

а для плотности $f(x)$

$$f(x) = \frac{F(\varepsilon) e^{-\sigma^2/2}}{\varepsilon \cdot \sigma \cdot \Phi(-\sigma) \sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2}. \quad (2.50)$$

Эквивалентный размер класса (a, b) есть $Z(a, b) = \frac{J_0(a, b)}{J_1(a, b)}$ поэтому

$$Z(a, b) = \varepsilon \cdot e^{\sigma^2/2} \frac{\Phi_H\left(\frac{1}{\sigma} \ln \frac{b}{\varepsilon} - \sigma\right) - \Phi_H\left(\frac{1}{\sigma} \ln \frac{a}{\varepsilon} - \sigma\right)}{\Phi_H\left(\frac{1}{\sigma} \ln \frac{b}{\varepsilon}\right) - \Phi_H\left(\frac{1}{\sigma} \ln \frac{a}{\varepsilon}\right)}. \quad (2.51)$$

Аналогично для класса $(0, x)$ получаем

$$Z(0, x) = \varepsilon \cdot e^{\sigma^2/2} \frac{\Phi_H(t - \sigma) - \Phi_H(-\sigma)}{\Phi_H(t) - 0.5}. \quad (2.52)$$

Для нахождения параметров в уравнении (3.57) заметим следующее.

Если известно значение выхода $F(\varepsilon)$ класса $0 - \varepsilon$, то необходимо найти только один параметр σ , потому что мода распределения ε известна при анализе сколь угодно малых частиц измельчения конкретных материалов. В частности, экспериментально было определено, что для рассевов шламов $\varepsilon = 0,041$, для струйного измельчения шамота $\varepsilon = 0,045$.

Допустим, известен выход класса $(0 - 0,01)$ мм. Обозначим через p от-

ношение $p = \frac{F(0,01)}{F(\varepsilon)}$, тогда $p = \frac{\Phi_H\left(-\frac{1}{\sigma} \ln \frac{x}{2} - \sigma\right)}{\Phi_H(-\sigma)}$.

Получаем неявную функцию $\sigma = \sigma(p)$. Имея таблицу этой функции и зная величину p , можно найти значение σ . Далее по изложенному алгоритму можно найти все необходимые величины, определяющие распределение как угодно малых частиц по крупности.

Предложенные алгоритмы вычисления крупности частиц при замкнутых циклах измельчения позволяют определять распределение по крупности получаемых продуктов во всем диапазоне. Выбирать математический подход возможно с учетом технологических требований производства.

Выводы

Подтверждение выдвинутой гипотезы о закономерности независимого измельчения фракций крупности в материале, как смеси фракций, и дальнейшее исследование изменения гранулометрического состава продуктов тонкого измельчения привело к выражению уравнений кинетики измельчения через статистические характеристики гранулометрии (математическое ожидание и стандартное отклонение изменения грансостава продуктов) и ус-

тановлению взаимосвязи гранулометрического состава с удельной поверхностью. Этот подход дал ключ к определению скорости изменения узких фракций материала при измельчении и выявлению соответствия полученного продукта требуемому уровню измельчения.

На основе результатов исследований, приведенных в главе сделаны следующие выводы:

1. Исследование энергетических особенностей замкнутых циклов тонкого измельчения минерального сырья в мельницах разного типа позволило уточнить условия выполнения гипотезы Риттингера и установить изменение коэффициента пропорциональности зависимости прироста вновь образованной поверхности и потраченной энергии на ее образование от крупности получаемого продукта. Установлено, что интенсивность образования новой поверхности при тонком измельчении твердых полезных ископаемых прямо пропорциональна потребляемой энергии и снижается при достижении крупности измельченного продукта некоторой критической величины (при шаровом измельчении - 40-60 мкм, при струйном - 10 - 25 мкм), связанной с видом измельчения и обусловленной повышением прочности частиц.

2. Максимальный выход заданного класса крупности, в аппаратах с накоплением материала достигается при условии дискретной подачи материала, при этом период дискретности зависит от скорости образования требуемого класса крупности. Соблюдение дискретности загрузки с при прочих равных условиях позволил повысить производительность на 2, %.

3. Вкрапленных полезных ископаемых при измельчении представляем как смесь узких фракций крупности, совместное измельчение которых характеризуется общей кинетикой измельчения материала. При этом, каждая узкая фракция крупности твердых полезных ископаемых в смеси измельчается независимо от наличия других фракций крупности в мельнице, согласно своей кинетике измельчения.

4. Уравнения кинетики тонкого измельчения определены через статистические характеристики гранулометрии (математическое ожидание и стан-

дартное отклонение изменения грансостава продуктов). в виде квадратичных парабол, коэффициенты которых зависят от свойств материала и вида мельницы. При этом, если величина эффективности измельчения $E_u = M_{\text{контр}} / M_{\text{исх}}^{\text{max}} > 0,5$, то процесс измельчения не завершен при заданном контрольном классе, и кривые зависимости стандартного отклонения кинетики грансостава от времени измельчения имеют отрицательную кривизну (выпуклость вверх). В противном случае (при достижении необходимой дисперсности) кривые приобретают положительную кривизну (становятся вогнутыми).

5. Скорость уменьшения крупных классов имеет убывающий характер, для средних и мелких фракций – знакопеременный характер. Струйное измельчение имеет значительные преимущества по скорости измельчения средних и мелких фракций, что позволяет рекомендовать использовать его на заключительных этапах измельчения материалов в замкнутом цикле.

6. Предложены алгоритмы вычисления крупности частиц при замкнутых циклах измельчения с учетом средних значений классов крупности и выходом продукта определенного мелкого класса крупности. Это позволяет определять распределение по крупности получаемых продуктов во всем диапазоне с учетом требуемого контрольного класса крупности.

3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

3.1 Анализ принципов моделирования измельчения

Традиционные методики расчета конструкций мельниц и технологических схем основаны на эмпирических соотношениях, сходных по характеру описания и структуре их уравнений, разработаны для мельниц малых габаритов. Они недостаточно учитывают свойства измельчаемых материалов, конструктивные особенности агрегатов, их взаимосвязь в технологической схеме и носят ведомственный характер [37, 42].

Оптимальные модели процессов и методы расчета на их основе должны включать: выявление минимального числа наиболее значимых факторов, определяющих процесс; отражение широкого диапазона возможного варьирования параметров; соблюдение требований наглядности и удобства в использовании математического описания для инженерных расчетов при сохранении достаточной с практической точки зрения степени его адекватности. Анализ литературных данных показывает, что любое усложнение модели с целью учета большего числа факторов ведет к увеличению числа параметров, резкому росту объема экспериментальных работ для определения величин параметров, но в силу нестабильности показателей процесса точность и информативность практических расчетов увеличиваются незначительно или не увеличиваются вовсе [42].

В последнее время для исследования сложных технологических схем используется системный анализ, позволяющий разделить рассматриваемый процесс на независимые составляющие, инвариантные к масштабу технических устройств, аппаратов, и затем изучать их отдельно, выражая результаты в математической форме. Математическое описание процесса в целом получается потом путем синтеза функциональных операторов составляющих уровней.

Рассматривая особенности механического измельчения материалов,

можно выделить три уровня в технологической цепочке процесса:

- изучение закономерностей разрушения отдельных частиц и кинетики процесса измельчения;
- выбор элементарного объема мельницы и моделирование процесса в нем;
- рассмотрение мельницы в целом и моделирование технологического процесса.

В составе модели изучаемого процесса можно выделить две составляющие: структура потока и кинетика обработки. При изучении технологии измельчения особое внимание уделяется второму аспекту моделирования.

При разработке кинетической модели учитывается тот факт, что механическая обработка протекает в две стадии. На 1-й стадии разрушение твердых тел идет по наиболее слабым местам (трещинам, микродефектам, порам), число которых падает с уменьшением размера частиц. На 2-й стадии разрушение определяется микроструктурой твердых тел. По мере повышения дисперсности материалов процесс приобретает обратимый характер и можно различить две составляющие: разрушение частиц внешней силой и агрегация частиц как самопроизвольная, так и вызванная внешними сжимающими усилиями. Исследования в лабораторных условиях измельчения большого числа материалов показали правильность моделирования кинетики измельчения путем расчленения процесса на отдельные стадии согласно схемам, учитывающим особенности процессов, происходящих при измельчении конкретного материала.

Так как механическая обработка материалов в настоящее время производится в агрегатах с различной геометрией и способом механического воздействия, в ряде случаев объединенных в систему, то для описания структуры потока материала в них могут применяться различные математические модели.

В общем случае задача измельчения дисперсных материалов состоит в определении оптимальных режимных, технологических параметров процесса

для измельчительного устройства конкретных размеров. На основе математических моделей могут быть решены вопросы определения производительности мельницы и дисперсности продукта, оптимального соотношения размеров конструктивных элементов мельницы, объема загрузки камер материалом, режима классификации материала, величин и составов массовых потоков через заданные аппараты технологической схемы.

3.2. Разработка балансовых статических моделей измельчения руд.

Из опыта обогащения руд [74] следует, что для первой стадии измельчения, когда в мельницу поступает дробленая руда, целесообразно применять замкнутый цикл с контрольной классификацией слива мельницы и возвратом в мельницу песков классификатора в виде циркулирующей нагрузки.

Для тонкого измельчения руд (вторая и последующие стадии) целесообразно применение замкнутых циклов с предварительной и контрольной классификацией, совмещенными в одном аппарате, например, в гидроциклоне.

Каждый из продуктов замкнутых циклов измельчения характеризуется величиной массового расхода Q , поверхностью S и функцией распределения частиц по крупности $\varphi(x)$. Операция классификации измельченных продуктов по крупности имеет сепарационную характеристику $E(x)$ – зависимость вероятности извлечения частиц от их крупности.

В мельнице к измельчаемому материалу через измельчающую среду подводится энергия ΔN , что вызывает разрушение частиц и образование новой поверхности ΔS , при этом, согласно гипотезе Риттингера [23] $\Delta N \sim \Delta S$.

В единицу времени в мельницу поступает материал в количестве Q . Его разделение на готовый по крупности продукт и тот, который должен поступить на повторное измельчение (циркулирующая нагрузка c), осуществляется в операции классификации. Ее результаты зависят от сепарационной

характеристики классификатора $E(x)$, определяемой сочетанием конструктивных и режимных параметров аппарата.

Учитывая изложенные выше сложности описания замкнутых циклов измельчения, в работе рассматривается упрощенная модель, сущность которой состоит в том, что процесс измельчения рассматривается как превращение крупных классов в мелкие. При этом часть энергии, подводимой к измельчаемому материалу, продуктивно расходуется именно на это превращение. Другая часть энергии расходуется на переизмельчение уже готового продукта. Пропорции между этими энергозатратами определяются содержанием контрольного класса в продукте, поступающем в мельницу θ , т. е. продуктивные затраты энергии пропорциональны $1 - \theta$. Здесь и далее содержания расчетного класса представлены в долях единицы.

Для снижения энергопотребления при тонком измельчении руд необходимо для данной руды с ее физико-механическими свойствами выбрать режим измельчения, обеспечивающий максимально возможную производительность по образованию контрольного класса крупности при обеспечении такого его содержания, которое позволяет получить необходимую степень раскрытия вкрапленных минералов.

К управляемым факторам мы относим время пребывания измельчаемого материала в мельнице и сепарационную характеристику классификатора. Исходя из принятого формата рассмотрения процесса измельчения, эту сепарационную характеристику целесообразно представить в виде показателей вероятности извлечения в готовый продукт (слив классификатора) класса крупности менее E' и более расчетного E'' .

Модели рассматриваемых замкнутых циклов измельчения составим на основе уравнений баланса расчетного класса в операции классификации и смешения продуктов. В качестве показателя, характеризующего крупность продукта, используем величину остатка R на контрольном сите в размерности долей единицы.

Кинетику измельчения, т.е. закономерности уменьшения во времени

остатка R на контрольном сите, примем на основании принятого в практике уравнения [23, 56, 53-54]:

$$R = R_0 e^{-kt}, \quad (3.1)$$

где R_0 - начальный остаток на контрольном сите; k - константа скорости измельчения; t - время измельчения.

Рассмотрим замкнутый цикл измельчения с контрольной классификацией измельченного продукта с получением готового по крупности и циркулирующей нагрузки (рис. 3.1).

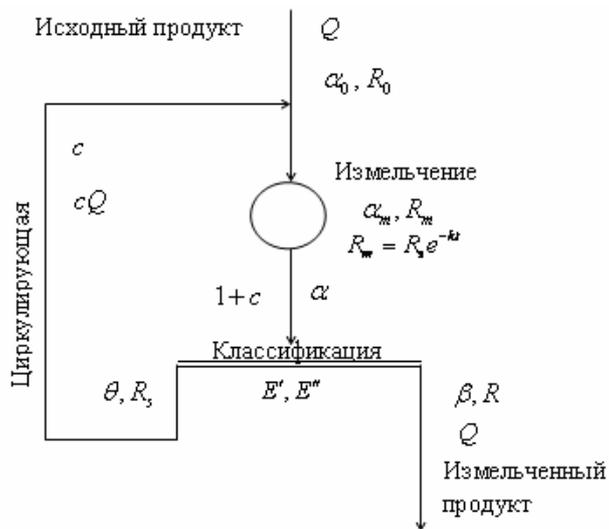


Рисунок 3.1 – Схема замкнутого цикла измельчения руд с контрольной классификацией разгрузки мельницы

Баланс остатка контрольного класса в операции классификации по крупности описывается уравнением:

$$(1+c)R_m = R + cR_s, \quad (3.2)$$

откуда остаток контрольного класса в измельченном продукте:

$$R = \frac{(1+c)R_m E''}{(1+c)R_m E'' + (1+c)(1-R_m)E'} = \frac{R_m E''}{R_m E'' + (1-R_m)E'}, \quad (3.3)$$

либо

$$R = R_m (1+c)E'', \quad (3.4)$$

откуда:

$$R_m = \frac{R}{E''(1+c)}. \quad (3.5)$$

С другой стороны, остаток контрольного класса в разгрузке мельницы R_m можно определить по кинетике измельчения, зная, что на измельчение поступает комбинированная загрузка (исходный продукт и циркулирующая нагрузка) с остатком контрольного класса R_n :

$$R_m = R_n e^{-kt}. \quad (3.6)$$

Остаток контрольного класса в загрузке мельницы определяется из уравнения его баланса:

$$R_n = \frac{R_0 + R \frac{1-E''}{E''}}{1+c}. \quad (3.7)$$

С другой стороны $R_n = R_m e^{kt}$, тогда, после преобразований, получаем:

$$e^{kt} = E'' \left(\frac{R_0}{R} - 1 \right) + 1 = A. \quad (3.8)$$

Поскольку время пребывания измельчаемого материала в мельнице определяется ее рабочим объемом V_m и объемным расходом материала и транспортирующей среды через мельницу Q_V , то:

$$t = \frac{V_m}{Q_V(1+c)} = \frac{1}{q_V(1+c)}. \quad (3.9)$$

Здесь q_V - удельная объемная производительность мельницы по исходному продукту. Ее значение может быть получено из предыдущего уравнения, т.е.:

$$\frac{k}{q_V(1+c)} = \ln A \quad (3.10)$$

$$q_V = \frac{k}{\ln A(1+c)}. \quad (3.11)$$

В практике обогащения полезных ископаемых принято использовать в качестве комплексного критерия, отображающего способность данной мельницы измельчать крупные частицы (крупнее контрольного класса) данного

материала, удельную производительность по вновь образованному классу:

$$q_a^V = q_V (R_0 - R) = \frac{k(R_0 - R)}{\ln A(1+c)}. \quad (3.12)$$

Выражение $(1+c)$ может быть определено из баланса крупного в операции классификации:

$$1 = (1+c)R_m E'' + (1+c)(1-R_m)E', \quad (3.13)$$

откуда:

$$1+c = \left(1 + R \frac{E' - E''}{E''}\right) / E'' \quad (3.14)$$

Во второй и последующих стадиях измельчения применяют замкнутые циклы с совмещением предварительной и контрольной классификации (рис. 3.2).

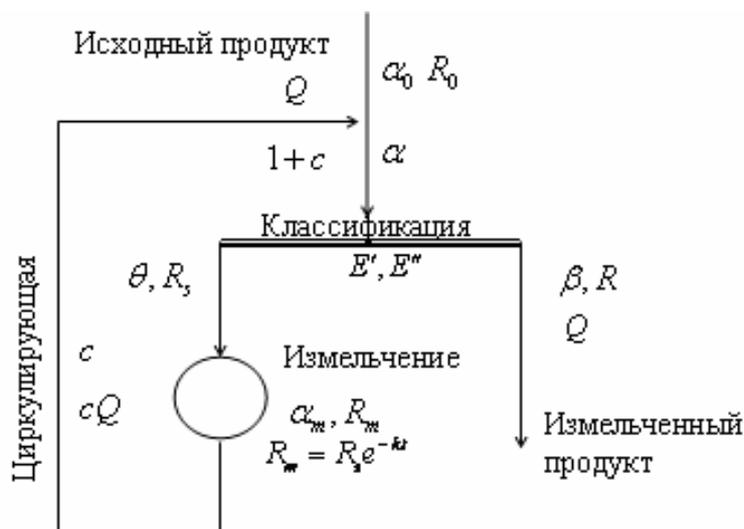


Рисунок 3.2 – Схема замкнутого цикла тонкого измельчения руд с совмещением предварительной и контрольной классификации

Отличительной особенностью таких циклов является то, что в мельницу поступают только пески классификатора после выделения готового продукта, как из исходного материала цикла, так и из разгрузки мельницы.

Используя, как и в предыдущем случае, уравнения баланса по остатку контрольного класса крупности при аналогичных преобразованиях, получа-

ем:

$$(1+c)R_n = R_m c + R_0; \quad (3.15)$$

$$R_n = \frac{R_m c + R_0}{1+c}; \quad (3.16)$$

$$R = \frac{R_n E''}{R_n E'' + (1-R_n)E'} = R_n E''(1+c); \quad (3.17)$$

$$R_n(1+c) = R + R_s c; \quad (3.18)$$

$$R_s = \frac{R_n(1+c) - R}{c} = R_n(1+c) \frac{1-E''}{c}; \quad (3.19)$$

$$R_m = R_n e^{-kt}; \quad (3.20)$$

$$R = \left[R_s (1-E'') \frac{1+c}{c} c e^{-kt} + R_0 \right] \cdot E''; \quad (3.21)$$

$$R = R(1-E'') e^{-kt} + R_0 E''; \quad (3.22)$$

$$e^{kt} = \frac{1-E''}{1 - \frac{R_0}{R} E''} = A; \quad (3.23)$$

$$q_a^V = \frac{k(R_0 - R)}{\ln A(1+c)}; \quad (3.24)$$

$$1+c = \frac{1}{R_n E'' + (1-R_n)E'} = \frac{1}{E' - \frac{R}{1+c} \cdot \frac{E' - E''}{E''}}; \quad (3.25)$$

$$1+c = \left(1 + R \frac{E' - E''}{E''} \right) / E'. \quad (3.26)$$

Сопоставляя представленные модели замкнутых циклов измельчения, следует отметить, что формулы (3.12) и (3.24) для расчета производительности мельницы по вновь образованному классу q_a^V идентичны. Идентичны также выражения для определения величины комбинированной нагрузки $(1+c)$ (исходный продукт и циркулирующая нагрузка), формулы (3.14) и (3.26). Отличны лишь выражения для параметра A , определяемого соотношением остатка контрольного класса до и после измельчения и степенью из-

влечения этого класса в слив классификатора. Для замкнутого цикла измельчения с контрольной классификацией разгрузки мельницы (рис. 3.1) он определяется исходя из формулы (3.8):

$$A = E''(R_0/R - 1) + 1, \quad (3.27)$$

а для замкнутого цикла измельчения с совмещением предварительной и контрольной классификации (рис. 3.2) – из формулы (3.23):

$$A = \frac{1 - E''}{1 - E'' R_0/R} \quad (3.28)$$

Таким образом, в результате моделирования получена зависимость для удельной производительности мельницы по вновь образованному контрольному классу при выполнении технологического задания получения требуемой дисперсности измельченного продукта. Рост производительности в данных условиях обеспечивается повышением эффективности классификации по крупности разгрузки мельницы, что обеспечивается сепарационной характеристикой. Для данной модели это достигается при увеличении степени извлечения E' в слив частиц крупностью менее контрольной и снижении степени извлечения частиц крупностью более контрольной E'' . При неизменной мощности электропривода с ростом производительности мельницы снижаются и удельные энергозатраты:

$$E_{y\partial} = \frac{N}{Q} = \frac{N(\beta - \alpha_0)}{q_a^V \delta V} = \frac{N(R_0 - R)}{q_a^V \delta V}, \text{ кВт} \cdot \text{ч/т} \quad (3.28)$$

Рассмотрим доказательство адекватности моделей замкнутых циклов на примере работы мельниц железорудных обогатительных фабрик, некоторые данные которых приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 Показатели работы рудоразмольных мельниц железоруд-

ных обогатительных фабрик

	q	q_{74}	q_{74}^V	α	β	ϑ
1	2	3	4	5	6	7
I	1,98	1,07	0,3057	28,27	60,00	11,3
	2,5	0,837	0,186	43,04	80,00	30,6
	1,95	0,234	0,0468	81,53	96,40	77,6
	2,15	0,9	0,2571	29,51	68,00	14,7
	1,51	0,55	0,1375	41,10	94,50	27,4
	2,63	0,96	0,2133	41,34	85,00	28
	2	0,28	0,056	81,06	95,50	76,5
II	2,49	1,38	0,3943	30,68	63,00	14,5
	2,38	0,98	0,2178	49,32	83,00	26,8
	1,74	0,29	0,058	81,54	96,00	71,2
	2,79	1,48	0,4229	32,67	56,30	14,5
	2,8	0,77	0,1711	54,70	88,00	41,7
	2,03	0,293	0,0586	82,77	97,80	77,5
III	4,53	2,13	0,6086	24,90	62,50	10,1
	1,7	0,58	0,1289	61,09	86,00	49
	1,78	0,3	0,06	88,16	94,50	85,5
	3,5	1,6	0,4571	34,19	62,00	20,8
	2,75	0,95	0,2111	52,09	89,00	38,2
	1,81	0,4	0,08	86,62	97,00	83,2
IV	3,25	1,95	0,5571	30,18	61,00	11,7
	2,53	0,78	0,1733	50,14	92,80	39,2
	2,06	0,17	0,034	84,85	98,30	79,2
	3,77	1,97	0,5629	28,11	63,00	5,4
	2,44	0,91	0,1936	47,27	94,20	35,4
	1	2	3	4	5	6
V	1,83	0,33	0,066	90,90	96,50	85
	2,6	1,63	0,4657	32,34	55,00	10,2
	2,62	0,75	0,1667	46,77	88,00	36
	1,8	0,24	0,048	76,26	98,00	67,8

В первой колонке помещены номера горно-обогатительных комбина-

тов Криворожского железорудного бассейна: I – Южный, II – Ново-Криворожский, III – Центральный, IV – Северный, V – Ингулецкий

Колонки 2 и 3 содержат значения удельной производительности ($\text{т/ч}\cdot\text{м}^3$) по исходному продукту q и по вновь образованному классу - 74 мкм q_{74} из источника [51]. В колонке 4 приведены значения удельной объемной производительности по вновь образованному классу - 74 мкм q_{74}^V ($\text{м}^3/\text{ч}\cdot\text{м}^3$), полученные путем деления значений из колонки 3 на плотность измельчаемого материала. Содержание класса крупности менее 74 мкм в питании гидравлического классификатора α , в его сливе β и в песках ϑ в колонках 5, 6 и 7 соответствуют значениям из источника [51].

По данным табл. 3.1 составлена вспомогательная табл. 3.2.

В колонках 2, 3, 4, в долях единицы представлены рассчитанные по данным табл.1 значения остатка контрольного класса в исходном продукте цикла измельчения R_o , в песках классификатора R_s и в его сливе (готовом, измельченном продукте) R . В колонках 5 и 6 представлены параметры сепарационной характеристики классификатора: извлечение в слив частиц крупностью менее E' и более контрольной E'' .

Анализ данных, приведенных в табл. 3.1 и 3.2, позволяет сделать вывод о том, что наиболее тесная корреляционная связь удельной объемной производительности по вновь образованному расчетному классу наблюдается с его содержанием в песках классификатора, образующих циркулирующую нагрузку (рис. 3.3).

Коэффициент достоверности аппроксимации колеблется от 0,9557 до 1 (табл. 3.3). Это свидетельствует о высокой степени корреляции сопоставляемых величин и о наличии, при более детальном рассмотрении, их нелинейной связи.

Таблица 3.2. Вспомогательные данные для анализа работы рудораз-
мольных мельниц

	R_o	R_s	R	E'	E''	q_a^V расч
1	2	3	4	5	6	7
I	0,7173	0,8870	0,4000	0,7395	0,1943	0,3114
	0,5696	0,6940	0,2000	0,4682	0,0884	0,1902
	0,1847	0,2240	0,0360	0,2630	0,0611	0,0451
	0,7049	0,8530	0,3200	0,6402	0,1261	0,3057
	0,5890	0,7260	0,0550	0,4782	0,0354	0,1385
	0,5866	0,7200	0,1500	0,4811	0,0598	0,2013
	0,1894	0,2350	0,0450	0,2887	0,0650	0,0577
II	0,6932	0,8550	0,3700	0,6955	0,2052	0,4381
	0,5068	0,7320	0,1700	0,6743	0,1344	0,2223
	0,1846	0,2880	0,0400	0,5063	0,1177	0,0595
	0,6733	0,8550	0,4370	0,7492	0,2822	0,4380
	0,4530	0,5830	0,1200	0,4687	0,1030	0,1727
	0,1723	0,2250	0,0220	0,3167	0,0471	0,0622
III	0,7510	0,8990	0,3750	0,7090	0,1411	0,5873
	0,3891	0,5100	0,1400	0,5106	0,2004	0,1295
	0,1184	0,1450	0,0550	0,3338	0,1587	0,0595
	0,6581	0,7920	0,3800	0,6137	0,2357	0,4875
	0,4791	0,6180	0,1100	0,4842	0,0929	0,2122
	0,1338	0,1680	0,0300	0,2772	0,0555	0,0827
IV	0,6982	0,8830	0,3900	0,7407	0,1541	0,5466
	0,4986	0,6080	0,0720	0,3971	0,0597	0,1746
	0,1515	0,2080	0,0170	0,3677	0,0702	0,0346
	0,7189	0,9460	0,3700	0,8782	0,1654	0,5571
	0,5273	0,6460	0,0580	0,4139	0,0412	0,2038
	0,0910	0,1500	0,0350	0,5060	0,1295	0,0647
V	0,6766	0,8980	0,4500	0,8718	0,4605	0,4689
	0,5323	0,6400	0,1200	0,4278	0,1060	0,1714
	0,2374	0,3220	0,0200	0,3815	0,0564	0,0492

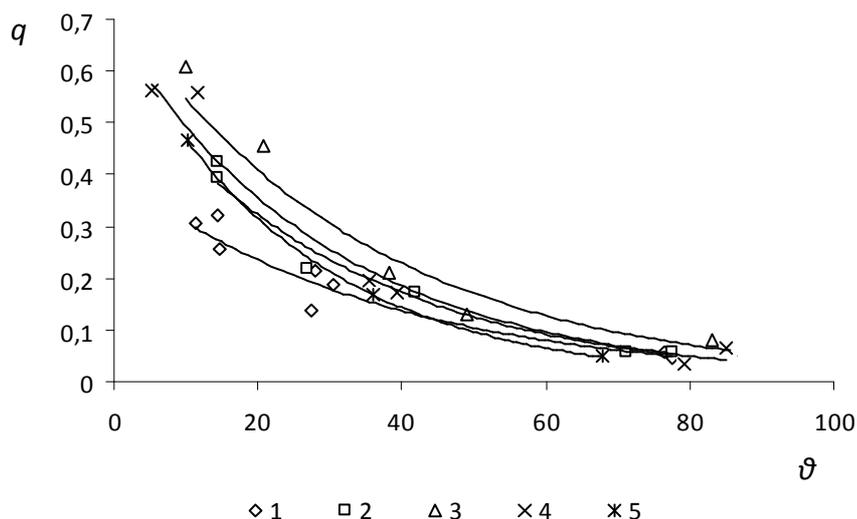


Рисунок 3.3 – Экспоненциальная аппроксимация взаимосвязи удельной производительности мельницы по вновь образованному классу -74 мкм от его содержания в песках классификатора

Таблица 3.3 Результаты аппроксимации зависимости удельной производительности по вновь образованному классу -74 мкм от его содержания в песках классификатора

	Уравнение	R^2	$q_{a \max}^V$
1	2	3	4
I	$q_{74}^V = 0,4037e^{-0,027\vartheta}$	0,9557	0,4037
II	$q_{74}^V = 0,6055e^{-0,032\vartheta}$	0,9829	0,6055
III	$q_{74}^V = 0,7315e^{-0,029\vartheta}$	0,9570	0,7315
IV	$q_{74}^V = 0,6837e^{-0,033\vartheta}$	0,9346	0,6837
V	$q_{74}^V = 0,6939e^{-0,039\vartheta}$	1,0000	0,6930

Такая нелинейность, вероятно, связана с изменением в области тонкого измельчения коэффициента пропорциональности зависимости, связывающей согласно гипотезе Риттингера удельную поверхность вновь образованного класса с энергией, потраченной на ее образование. Об этом было сказано

выше. Вместе с тем, приведенная аргументация свидетельствует о снижении удельной производительности мельниц по вновь образованному классу при увеличении его содержания в питании мельницы. Когда содержание расчетного класса равно нулю, то удельная производительность мельницы будет иметь максимальное значение (колонка 4 табл. 3.2).

Эта величина может быть принята в качестве константы мельницы при измельчении данной руды и используется в уравнении кинетики измельчения (3.6) и в формулах (3.12) и (3.24) для расчета производительности замкнутых циклов измельчения. Ее применение в расчетах совместно с данными вспомогательной табл. 3.2 позволило рассчитать удельную производительность мельниц в замкнутом цикле (колонка 7 табл. 3.2). Сопоставление полученных результатов со значениями, достигнутыми в промышленности (колонка 4 табл. 3.1) представлено на рис. 3.4.

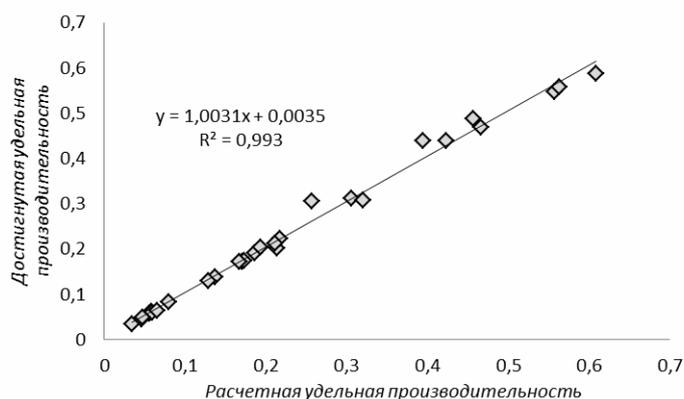


Рисунок 3.4 – Результаты сопоставления расчетной и достигнутой в промышленности удельной объемной производительности мельниц по классу 74 мкм

Высокое значение коэффициента надежности аппроксимации и угловой коэффициент линейного уравнения близкий к единице позволяют утверждать, что разработанные модели замкнутых циклов измельчения адекватны во всем рассмотренном диапазоне изменения режимных параметров.

Анализ разработанных моделей позволяет сделать вывод о значительной роли классификации по крупности в циклах измельчения, эффективность которой предопределяется ее сепарационной характеристикой (в данных моделях это извлечения в слив классификатора мелкого E' и крупного E'' классов), а также соотношение крупности исходного и готового продуктов цикла измельчения.

Этот анализ, а также приведенная выше экспериментальная зависимость удельной производительности мельницы от содержания расчетного класса в песках классификатора подтверждают, что снижению этого содержания способствует повышение эффективности классификации разгрузки мельницы. Разработанные математические модели замкнутых циклов измельчения, подтвержденные показателями измельчения железных руд в промышленных условиях, могут использоваться для проектирования технологий измельчения и совершенствования существующих, которое должно заключаться в оптимизации процесса классификации по крупности и распределения крупности измельчаемых продуктов по стадиям измельчения.

3.3 Создание динамической модели замкнутого цикла измельчения

Процесс измельчения минерального сырья в замкнутом цикле рассматривается как динамическая система. Это значит, что для процесса измельчения однозначно определено понятие состояния как совокупности некоторых величин в данный момент времени и задан закон, описывающий изменение начального состояния во времени и позволяющий прогнозировать будущее состояние динамической системы. Выбор одного из способов описания закона эволюции задает конкретный вид математической модели соответствующей динамической системы

Концептуальная модель исследуемой системы представлена в виде структурной схемы на рис. 3.5. Система состоит из одного входного потока

материала (В), накопителя (Н), мельницы (М), классификатор (К), выходного потока (П).

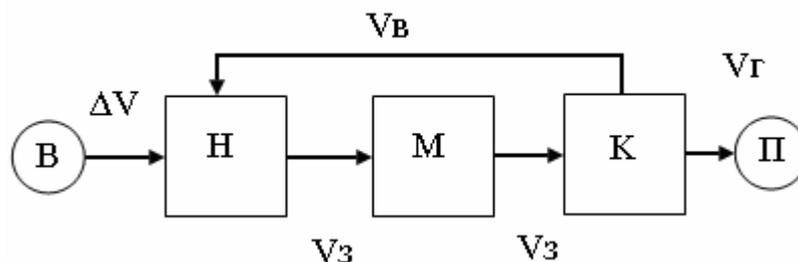


Рисунок 3.5 – Структурная схема модели

В модели предполагается, что поток представляет собой смесь разноклассового по крупности сыпучего материала В, который дискретными порциями ΔV поступает в накопитель Н через равные промежутки времени Δt . В течение этого промежутка времени порция материала, находящаяся в накопителе V_m , поступает в мельницу М, измельчается, и весь продукт попадает в классификатор К. В классификаторе происходит отделение некоего объема готового материала V_r , а объем материала $V_{ц} = V_m - V_r$ поступает в накопитель. Таким образом, $V_m = \Delta V + V_r$.

Для соблюдения такого баланса предполагается, что в начальный момент времени в мельнице находится объем материала V_m , т.е. первая подача объема ΔV в накопитель осуществляется одновременно с подачей потока готового продукта V_r . Для реализации этого условия в структурную схему модели введен переключатель К, который в момент пуска модели загружает в мельницу объем материала V_m , затем переключается и в течении всего времени работы модели находится в этом состоянии. В модели также предполагается, что объем материала V_m , поступающий в мельницу, должен быть постоянным и принимается равным $V_m = k_m V_{\text{мел}}$, где $V_{\text{мел}}$ - объем мельницы, k_m - коэффициент загрузки мельницы, при которой процесс измельчения имеет наивысшую эффективность. Для определенности в соответствии с экспериментальными данными принимается, что $k_m = 0,75$.

В стационарном режиме накопитель получает объем материала V_{Γ} , одновременно генерируется подача объема $\Delta V = k_m V_{\text{мел}} - V_{\Gamma}$. Эти два объема складываются и поступают в мельницу. Таким образом, объем материала, измельчаемый в мельнице, всегда постоянен, а фракционный состав материала - различный.

Фракционный состав подвергается изменению в трех узлах технологической схемы: в смесителе, в который поступают два потока с различным грансоставом; в мельнице, где происходит измельчение крупных классов; в классификаторе, в котором отделяются классы готовой продукции. Поэтому фракционный состав материала в модели переменен и определяется коэффициентами $k[x]_i$, где $[x]$ индекс участка технологической схемы, где определяется этот коэффициент, а i - номер класса гранулометрического состава смеси. При этом $\sum k[x]_i = 1$.

На рис. 3.6 показаны соответствующие коэффициенты на различных технологических участках измельчительной установки.

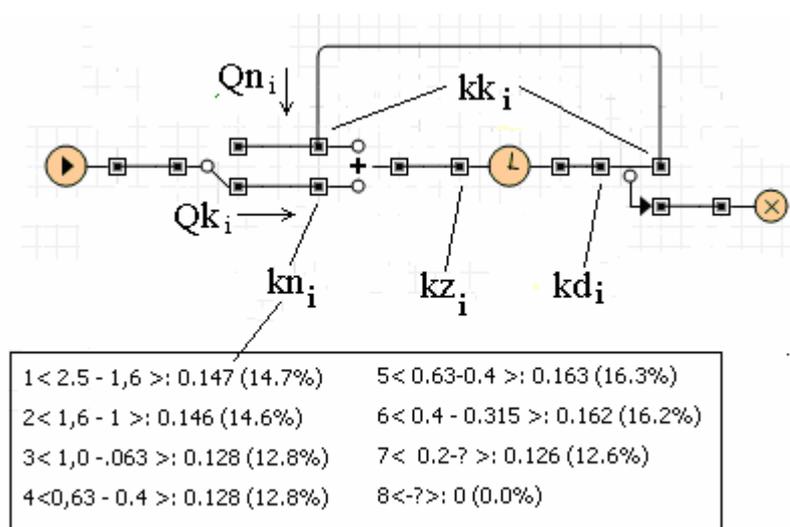


Рисунок 3.6 – Структурная схема модели в стационарном режиме

В начальный момент времени (в момент пуска модели) предполагается, что фракционный состав материала, находящегося в мельнице, соответствует

составу поступающего потока материала и определяется матрицей коэффициентов kn_i

Гранулометрический состав материала поступающего в мельницу определяется зависимостью: $kz_i = (Qn_i \cdot kn_i + Qk_i \cdot kk_i) / \sum (Qn_i + Qk_i)$, где Qn_i , Qk_i – расход i -го класса с питателя и обратной ветви (циркуляционной нагрузки), соответственно; kn_i , kk_i – коэффициенты гранулометрического состава для i класса, поступающей с питателя и обратной ветви. Гранулометрический состав материала вторичного потока материала, поступающего в мельницу после классификатора (циркулирующая нагрузка) определяется зависимостью: $kk_i = \sum (Qn_i + Qk_i) kd_i / \sum (Qn_i + Qk_i)$

Гранулометрический состав материала, выходящего из мельницы, в данной модели определяется на основе кинетики измельчения, т.е. масса материала при измельчении за время Δt определяется селективной функцией измельчения S_{ij} , которая показывает долю i класса, разрушаемого за единицу времени. В разрабатываемой модели селективная функция задается треугольной матрицей коэффициентов измельчаемости a_{ij} , определяющих долю объема массы материала, которая переходит в результате разрушения из i класса в j класс и определяется соотношениями $kd_n = kz_1 \cdot \sum_{j=1}^8 a_{nj}$, $n = 1 \dots 8$.

Для определенности выбрано восемь классов.

Матрица селективной функции имеет вид

$$\begin{matrix} a_{11} & 0 & \dots & 0 \\ a_{12} & a_{22} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & & \\ a_{18} & a_{28} & \dots & a_{78} \end{matrix} \quad (3.29)$$

В качестве среды моделирования была выбрана среда моделирования AnyLogic - инструмент имитационного моделирования нового поколения, поддерживающий концепции и средства из нескольких методов моделирования: дискретно-событийного моделирования, системной динамики и

агентного моделирования [79]. Основными строительными блоками модели AnyLogic являются активные объекты, которые позволяют моделировать любые объекты реального мира. Активный объект является экземпляром соответствующего класса, который реализуется путем создания собственных активных объектов или использованием объектов библиотек AnyLogic и заданием их взаимосвязи. AnyLogic интерпретирует создаваемые классы активных объектов в классы Java. Поэтому модель позволяет пользоваться всеми преимуществами объектно-ориентированного моделирования.

В ходе экспериментов на модели проведено варьирование ее параметров: объема загружаемого материала и циркулирующей нагрузки, времени измельчения и исходного фракционного состава и требуемой дисперсности. Получены зависимости этих параметров от других параметров во времени. При этом реализован мониторинг изменения:

- основных структурных элементов технологической схемы;
- характеристик гранулометрического состава на каждом элементе технологической схемы;
- величины потоков в отдельных ветвях технологической схемы,
- значения рабочего заполнения мельницы в течение всего процесса.

Исследования связи расхода исходного материала и готового продукта показал влияние типа загрузки мельницы на производительность мельницы.

На графике $G(t)$ рис. 3.7 цифрой 1 обозначена производительность при постоянной загрузке, 2- при дискретной загрузке с выбором периода загрузки, зависящим от измельчаемости материала. В данном случае использовалась матрица измельчения кварцевого песка в струйной мельнице. При дискретной загрузке производительность увеличилась на 1,4%.

Таким образом, показана возможность применения имитационного метода моделирования для исследования процесса измельчения в рамках кинетики фракционного состава в основных узлах технологической схемы замкнутого цикла и подтверждено положение, установленное ранее в разделе 2, о

влиянии дискретности загрузки на производительность мельницы. Динамика процессов в помольном узле должна быть рассмотрена с других позиций.

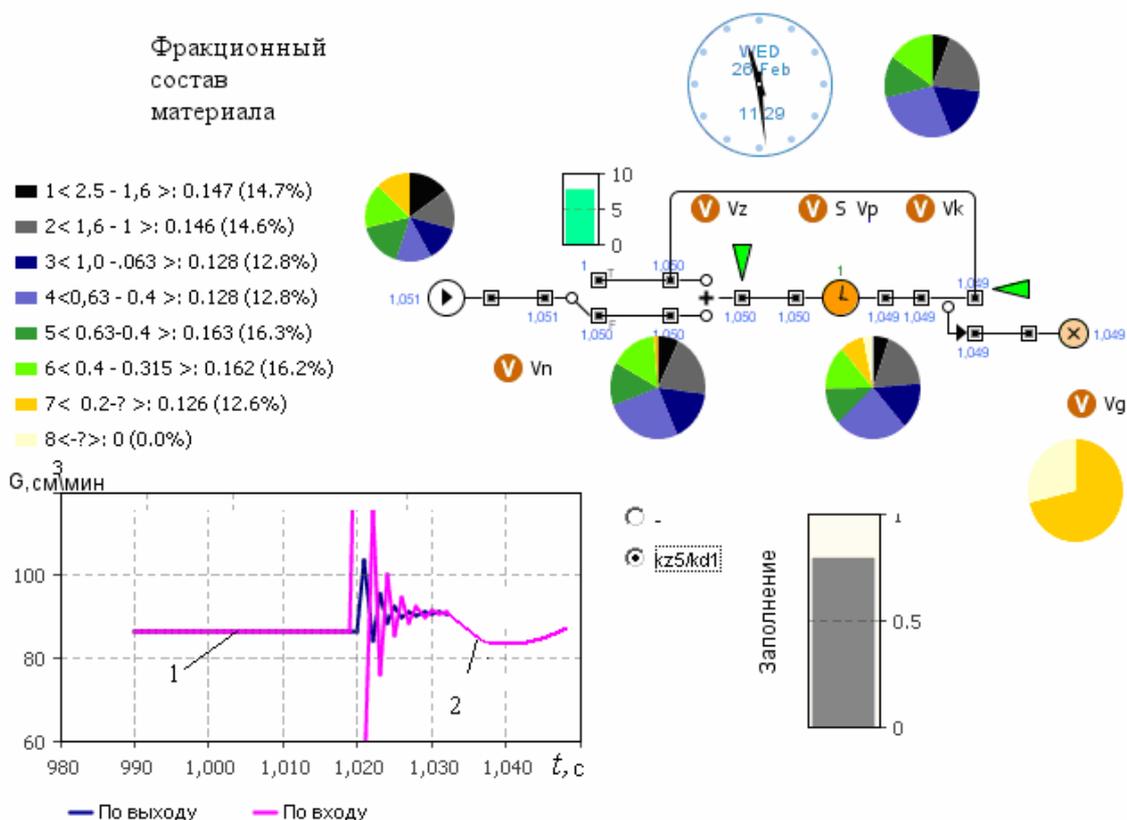


Рисунок 3.7 – Общий вид рабочего окна программы при испытаниях модели

Разработанная модель замкнутого цикла измельчения основана на дискретно-событийном подходе моделирования стохастических динамических процессов, где начальными данными были фракционные потоки исходного материала, заданный объем загрузки мельницы, необходимая крупность измельченного продукта (контрольный класс) и заданное фиксированное время измельчения материала. Данная модель может быть использована для создания системы управления технологическим процессом.

3.4 Моделирование процесса формирования гранулометрического состава продуктов измельчения

На втором этапе моделирования одной из основных задач было моделирование кинетики переходов между классами материала внутри мельницы. В этом случае целью стало определение необходимого времени измельчения до заданной крупности и выявление критериев управления производительностью измельчительной установки.

В ходе работы программного комплекса проводится анализ изменения объемов фракций во времени. Используется 5-х фракционная модель материала при измельчении (см. рис. 3.8).

Исходный материал, загружаемый в мельницу, содержит три класса (F1, F2, F3), два класса образуются при измельчении материала в мельнице (F4, F5), при этом класс F4 – является контрольным классом продукта измельчения. Класс F5 – объем нежелательного переизмельченного продукта.

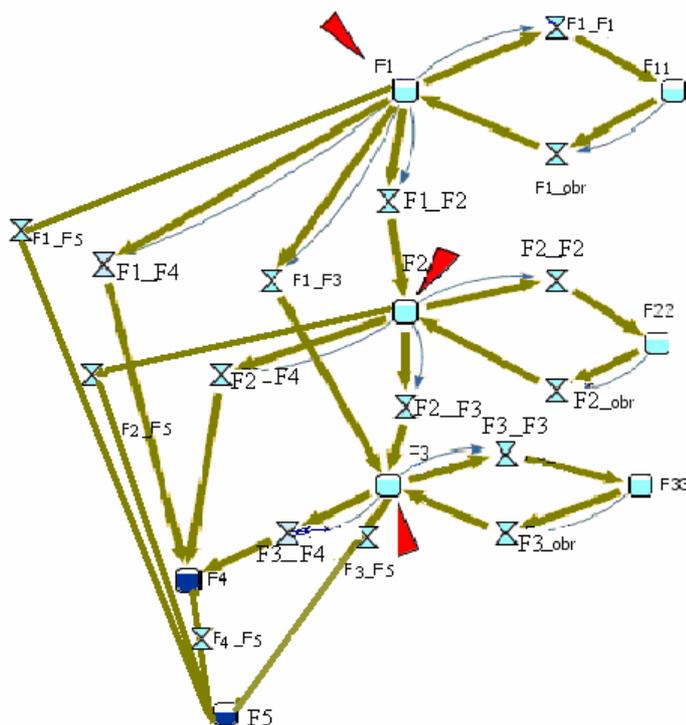


Рисунок 3.8 – Схема фракционных потоков в мельнице

Переменными модели являются следующие параметры: интервал времени дискретной подачи исходного продукта в мельницу Δt (мс), объем и фракционный состав исходного материала.

Объем классов в каждый момент времени вычисляется в соответствии с дифференциальными уравнениями:

$$d(F_i)/dt = - \sum_{j=1}^5 (k_{i,j} F_i - F_j). \quad (3.30)$$

Решение этих дифференциальных уравнений осуществляется численным методом Эйлера с начальным значением $dt = 1$ мсек. Значение коэффициентов $k_{i,j}$ определяется долей соответствующих объемов фракций, таким образом, матрица $\|k_{i,j}\|$ является матрицей измельчения данного материала.

Далее приняты обозначения:

$F_i - F_j$ – поток материала j класса, возникающий в результате измельчения i класса за время dt , т.е. объем i класса, перешедший в j класс;

F_{ii} – объем класса, оставшейся в i класса;

$F1_obr, F2_ F1_obr, F3 _obr$ – циркулирующие потоки соответствующих классов крупности материала внутри мельницы.

Один и тот же выход контрольного класса крупности можно получить при различной величине вновь образованной поверхности этого продукта [49]. Увеличение этого показателя дисперсности при соблюдении требования заданного выхода контрольного класса крупности обозначает переизмельчение продукта измельчения. Это ведет к повышенному энергопотреблению мельницы в ходе измельчения. Для решения этой проблемы в динамической модели был введен поверхностный показатель, позволяющий контролировать величину образованной поверхности частиц измельченного продукта.

Удельная поверхность материала определяется в виде $S = k_s \sum_{i=1}^5 \frac{\beta_i}{\bar{d}_i}$, где

β - выход класса крупности со средним размером частиц \bar{d}_i , k_s –показатель, связанный со свойствами материала.

Исследования связи расхода исходного материала и готового продукта показал существующую зависимость производительности мельницы не только от загрузки мельницы, но и от крупности исходного материала на начальном этапе измельчения и требуемой дисперсности измельченного продукта. После установления стабильной работы мельницы производительность зависит при прочих равных условиях от соотношения отдельных классов в общем объеме материала до измельчения и после него. Это позволяет разработать оптимизационные критерии управления производительностью мельницы на основе контроля объема загрузки материала и циркулирующей нагрузки в зависимости от образованной удельной поверхности материала, вычисляемой по соотношениям отдельных классов крупности материала.

На основе испытания модели было определено выражение для переключателя K , названного показателем переизмельчения и задаваемого отношением объема самого мелкого класса на входе в мельницу к объему самого крупного класса на выходе из мельницы при поступлении продукта в классификатор $K = \kappa_{z8} / \kappa_{d1}$. Таким образом, объем поступающего материала в мельницу определяется формулой $V_n = K \cdot \kappa_M V_M - V_{ц}$.

При $K = 1$ не учитывается влияние объема поступающих мелких фракций. После переключения на режим контроля переизмельчения, т.е. при условии минимальной удельной поверхности при заданном выходе контрольного класса ($K > 1$), наблюдается повышение производительности на 5-7% при прочих равных условиях (рис. 3.9, кривая 2).

На рис. 3.9 показано изменение производительности в ходе экспериментов над моделью замкнутого цикла тонкого измельчения.

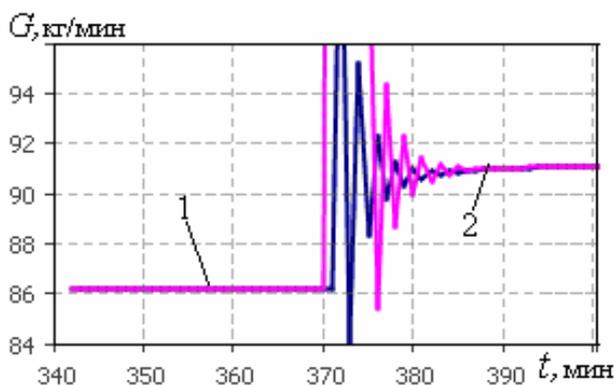


Рисунок 3.9 – Повышение производительности мельницы при использовании оптимального времени измельчения и учете коэффициента переизмельчения

Таким образом, установлено, что наибольшая производительность, т. е. наибольшая скорость образования измельченного продукта с определенным гранулометрическим составом при минимальных затратах энергии достигается при минимально возможной для этих условий удельной поверхности.

В ходе работы динамической модели замкнутого цикла вычисляется время измельчения данного исходного материала до заданного контрольного класса и максимально допустимой вновь образованной поверхности продукта измельчения. Оптимальное время измельчения в камере, определенное во второй модели, подставляется в первую модель. Это позволяет связать две созданные модели в единый комплекс. Таким образом, определяется оптимальный режим работы всего замкнутого цикла.

Исследования показали перспективность динамического моделирования тонкого измельчения в замкнутых циклах. На основе моделирования кинетики измельчения определено время измельчения для получения заданного выхода контрольного класса. Выделенный поверхностный параметр, связывающий вновь образованную поверхность с выходом контрольного класса, позволил разработать систему контроля качества продукта, снижения его переизмельчения и систему управления производительностью мельницы.

3.5 Анализ закономерности роста удельной поверхности продукта при измельчении

Для исследования и дальнейшего моделирования процесс измельчения необходимо разделить на последовательность подпроцессов. В общем, процесс измельчения можно рассматривать как процесс, состоящий из повторяющихся шагов, каждый из которых состоит из двух основных операций: отбор материала для разрушения и последующее разрушение отобранного материала. В таком случае можно ввести количественные характеристики этих операций: $p_n(y)$ – вероятность разрушения частиц, имеющих размер y на n – м шаге процесса разрушения, $F(x,y)$ – кумулятивное распределение в диапазоне крупности $x < y$ массы частиц размером y . После n шагов повторяющегося разрушения результирующая функция распределения измельченного материала асимптотически приближается к логарифмически нормальному закону, что часто подтверждается на практике.

Такой подход к процессу измельчения стал основой матричных и кинетических моделей процесса. В матричной модели процесс дробления или измельчения рассматривается как последовательность актов разрушения, причем исходным материалом каждого следующего акта есть продукт предыдущего. Чем продолжительнее процесс измельчения, тем больше число таких актов, тем выше степень сокращения крупности. В кинетической модели процесс рассматривается как непрерывный, характеризующийся скоростью протекания, и степенью сокращения крупности непрерывно по мере течения процесса. Известные модели обоих типов [23, 81] рассматривали процесс измельчения по изменению грансостава материала, т.е. сокращение крупности понималось как уменьшение размера частиц в классах, определенных гранулометрическим составом.

Из анализа рисунка, показывающего области действия «энергo-крупностных» законов (рис. 1.1 раздела 1) следует, что для диапазона крупности измельченных частиц, характерного для переработки минерального

сырья, наиболее применима гипотеза Риттингера, согласно которой вновь образованная при измельчении поверхность пропорциональна затраченной энергии, т.е.

$$\Delta S = k_R \Delta E. \quad (3.31)$$

Допустим, что в измельчительный аппарат поступает в единицу времени Q_0 исходного материала с начальной поверхностью s_0 и гранулометрическим составом, который характеризуется функцией распределения по крупности $\varphi_0(x)$. Выход частиц крупностью менее x при этом составит

$\gamma_{-x} = \int_0^x \varphi_0(x) dx$, а удельная поверхность исходного продукта будет равна

$s_0 = k_s \int_0^{x_{\max}} \frac{\varphi_0(x)}{x} dx$. При этом его поверхность составит $S_0 = Q_0 s_0$.

К исходному продукту внутри измельчительного аппарата подводится энергия ΔE , которая приводит к разрушению поступившего материала и образованию новой поверхности ΔS . Величина подведенной к измельчаемому материалу энергии определяется мощностью и временем пребывания в рабочем пространстве мельницы, т.е. $\Delta E = k_N \Delta t$. Время пребывания связано с рабочим объемом мельницы и объемным расходом поступающих продуктов

(твердая фаза и транспортирующая среда) $\Delta t = \frac{V}{Q_V}$.

Из рабочего объема мельницы с целью недопущения переизмельчения поступающего материала с помощью транспортирующей среды извлекается заведомо недоизмельченный продукт, который затем во внешнем классификаторе разделяется на готовый по крупности продукт и более крупный, который вновь направляется в ту же мельницу. Таким способом формируется замкнутый цикл измельчения (рис. 3.10).

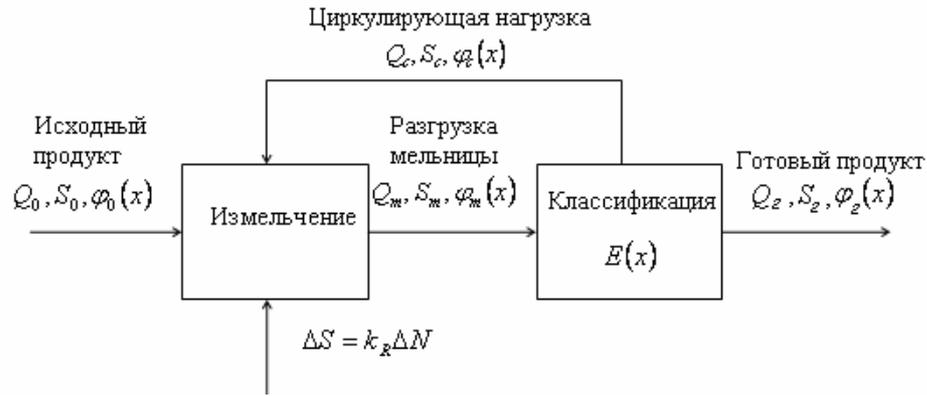


Рисунок 3.10 – Схема замкнутого цикла измельчения

В мельницу, таким образом, поступает исходный материал и циркулирующая нагрузка $Q_m = Q_0 + Q_c$ с поверхностью $S_0 + S_c$, а из мельницы выходит этот продукт с поверхностью, возросшей за счет разрушения на величину ΔS , т.е. $S_m = S_0 + S_c + \Delta S$.

Разгрузка мельницы имеет гранулометрический состав, описываемый функцией распределения $\varphi_m(x)$. При известной сепарационной характеристике классификатора $E(x)$ и условии $Q_0 = Q_2$ величина циркулирующей нагрузки составит:

$$Q_c = Q_0 \left(\frac{1}{\int_0^{x_{\max}} \varphi_m(x) E(x) dx} - 1 \right). \quad (3.32)$$

Зная величину циркулирующей нагрузки и определяя гранулометрический состав разгрузки мельницы с помощью уравнения кинетики измельчения, можно оптимизировать процесс измельчения, взявши за основу целевую функцию $S \Rightarrow S_{\min}$ при достижении заданного технологией последующего использования измельченного продукта содержания в нем расчетного (контрольного) класса крупности, т.е. $\beta_{<a} = \frac{\int_0^{x_{\max}} \varphi_m(x) E(x) dx}{\int_0^a \varphi_m(x) E(x) dx}$.

Для успешного применения данной модели необходимо уточнение уравнения кинетики измельчения и установление взаимосвязи удельной поверхности измельченного продукта и функции распределения частиц измельченного материала по крупности.

Для решения этих проблем рассмотрим статистический подход. Более формальный смысл, удобный для математического моделирования, имеет кривая распределения числа зерен. Многие теоретические результаты были получены именно исходя из нее. О.Н. Тихонов [18] пользуется, кроме указанных, еще функцией распределения в объемных и поверхностных долях. Он показывает, что этот способ описания гранулометрического состава оказывается более естественным при решении многих задач массопереноса в обогатительных аппаратах. Однако необходимо задать универсальный способ определения гранулометрического состава, т.е. чтобы его можно было применять для различных задач технологии. Нужно указать такую функцию распределения, которая бы совмещала всю информацию о распределении частиц, содержащуюся в различных способах задания смеси зерен.

Такой функцией может служить истинная функция распределения частиц по размерам, которую нужно понимать в строгом теоретико-вероятностном смысле, вытекающем из результата Колмогорова [72]. Как показал Колмогоров А.Н., это распределение подчиняется логарифмическому

закону $F(x) = \Phi\left(\frac{1}{\sigma} \ln \frac{x}{\mu}\right)$, где $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-t^2/2} dt$ – интеграл вероятностей.

Логарифмически нормальное распределение используется для представления асимметричных распределений, характерных для продуктов дробления и измельчения, причем, если распределение числа частиц логарифмически нормальное, то логарифмически нормальным является также распределение поверхностей и объема частиц.

Уравнение логарифмически нормального распределения имеет вид:

$$N = [(\sum N) \exp\{-\frac{(\ln d - \ln \bar{d})^2}{2(\ln \chi)^2}\}] / (\ln \chi \sqrt{2\pi}), \quad (3.33)$$

где $\ln \bar{d} = \sum (N / \ln d) / \sum N$ – логарифм среднего геометрического диаметра;
 $\ln \chi = [\sum N (\ln d - \ln \bar{d})^2 / \sum N]^{1/2}$ – среднее квадратическое отклонение логарифма диаметра.

В работе [65] показано, что при различном усреднении размеров частиц продуктов наиболее близкие объемные коэффициенты теплообмена получены по узким классам, а поверхности – по среднему диаметру классов. Поэтому рассмотрим связь функций распределения частиц по классам крупности и поверхности, когда последняя выражена через средний диаметр частиц класса.

Обозначим M – общую массу совокупности частиц, к которым относится выбранный класс $(x, x + dx)$; $F(x)$ – функцию весового распределения (кривая гранулометрического состава); $dF(x)$ – элементарный выход бесконечно узкого класса; ρ – средняя плотность частиц; K_V, K_S – коэффициенты формы, определяющие объем и поверхность частицы через ее диаметр x (для шара $K_V = \pi/6, K_S = \pi$). Тогда в бесконечно узком классе крупности $(x, x + dx)$ число зерен и поверхность dS связаны следующим соотношением: $ds = K_S x^2 dn$, где K_S – коэффициент формы, определяющий поверхность частицы через ее диаметр x (для шара $K_S = \pi$). Величины dn и ds можно выразить через элементарный выход $dF(x)$:

$$dn = \frac{M}{K_V \rho} \frac{dF(x)}{x^3}, \quad ds = \frac{MK_S}{K_V \rho} \frac{1}{x} dF(x). \quad (3.34)$$

Отсюда найдем удельную поверхность S/M и удельное число частиц, попавших в любой класс (a, b) , на единицу массы N/M :

$$\frac{S}{M} = \frac{1}{\rho} \frac{K_S}{K_V} \int_a^b x^{-1} dF(x), \quad \frac{N}{M} = \frac{1}{\rho} \frac{1}{K_V} \int_a^b x^{-3} dF(x). \quad (3.35)$$

Формулы (3.11, 3.12) позволяют рассчитать удельную поверхность и число частиц для произвольного гранулометрического состава частиц. Например для шарообразной формы зерен, получаем:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{S}{M} = \frac{6}{\rho} \frac{b}{a} \int x^{-1} dF(x) = \frac{6}{\rho} \frac{b}{a} \int x^{-1} \varphi(x) dx; \\ \frac{N}{M} = \frac{1}{\rho} \frac{6}{\pi} \frac{b}{a} \int x^{-3} dF(x) = \frac{6}{\pi \rho} \frac{b}{a} \int x^{-3} \varphi(x) dx. \end{array} \right. \quad (3.36)$$

Результаты исследований [62] показывают, что если массив размеров частиц $\{x_i\}$ задан в результате проведенных натуральных замеров, то проще будет не определять параметры закона распределения, а сразу определить среднее по формуле

$$x_{cp} = \left(\sum x_i^3 \right) / \left(\sum x_i^2 \right). \quad (3.37)$$

Таким образом, имея распределение частиц по классам крупности $\{x_i\}$, определяем средний диаметр частиц в классе по формуле (3.14). Затем по распределению частиц по крупности $\varphi(x)$ находим приращение площади через удельную поверхность по (3.36) для частиц каждого класса, считая, что их диаметр равен вычисленному среднему диаметру класса или в общем случае по (3.35).

Выразим формулы в матричном виде через гранулометрическое распределение $\varphi(x_i)$. В ходе измельчения поверхность частиц каждого класса изменяется. Пусть $\Delta S_{i,j}$ – изменение поверхности частиц i класса, перешедших в j класс. Тогда можно записать $\Delta S_{i,j} = \sum_{i=1}^n x_{i,j} f_i$, где распределение по-

верхностей по классам крупности выражается $f_i = S_i = k_s \int_{x_i}^{x_{i+1}} \frac{\varphi(x)}{x} dx$.

Краткая матричная запись уравнения изменения поверхности при измельчении:

$$\Delta S = Xf \quad (3.38)$$

Необходимо отметить, что не во всех классах происходит изменение

поверхности, поэтому обозначим вектором разрушения $R = \{r_1 \dots r_n\}$ долю тех частиц в классах, которые разрушились и изменили поверхность, тогда изменения поверхности разрушенными частицами B будет представлены функцией Rf , где $B \subset X$ - часть частиц материала, которые разрушены.

$$\begin{bmatrix} R_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & R_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & R_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 f_1 \\ R_2 f_2 \\ \vdots \\ R_n f_n \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

В этом случае оставшаяся без изменений поверхность не разрушенных частиц может быть выражена произведением $(1-R)f$. Поэтому уравнение (3.38) можно уточнить в виде:

$$\Delta S = BRf + (1 - R)f \quad (3.40)$$

Возвращаясь к схеме процесса измельчения с классификацией (см. рис. 3.7), получаем систему матричных уравнений:

$$\begin{cases} S_m = S_c + S_2 \\ S_m = S_0 + S_c + \Delta S \\ \Delta S = BRf + (1 - R)f \end{cases} \quad (3.41)$$

После преобразований системы получаем окончательное матричное уравнения процесса увеличения поверхности при порционном измельчении (дроблении):

$$S_2 = S_0 + BRf + (1 - R)f \quad (3.42)$$

Оптимизация процесса измельчения направлена на поиск наименьшей поверхности измельченного продукта при достижении заданного содержания расчетного (контрольного) класса крупности.

Рассмотренные варианты моделирования процесса измельчения мине-

рального сырья дополняют друг друга. Их совместное использование может оказаться весьма продуктивным, однако требует дополнительного изучения уравнение кинетики измельчения, основанного на пропорциональности вновь образованной поверхности при измельчении величине подведенной энергии.

3.6 Разработка стохастической модели процесса измельчения

Учитывая статистическую природу гетерогенных систем, а также вероятностный характер процессов нагружения частиц дисперсной фазы в современных аппаратах, следует дополнить детерминистическую теорию стохастической. Фундамент стохастической теории процессов диспергирования заложен также в работах советских ученых Е.А. Непомнящего [44 - 45], Ф.Г. Ахмадиева, А.А. Александровского [46], А.И. Зайцева и Д.О. Бытева [47] и др. Применение методов стохастических Марковских процессов и неравновесной статистической механики позволяет разрабатывать содержательные модели кинетики диспергирования, адекватно описывающие физику процессов в аппаратах с различными способами подвода энергии к обрабатываемым системам. Очевидно, используя эти модели, можно создавать более надежные и эффективные методы расчета нового оборудования для диспергирования, активации и совмещенных процессов.

Для разработки и внедрения компьютерных технологий необходимо сформировать банк удобных в практических расчетах моделей кинетики диспергирования и механоактивации, построенных на единой методологической основе. К числу достоинств, которыми обладает стохастический подход к конструированию моделей диспергирования и механоактивации, а также полученные с его помощью сами модели, следует отнести следующее.

В настоящее время существенный вклад в развитие методов конструирования моделей химико-технологических процессов с помощью теории самоорганизации в открытых системах и теории нелинейных гидродинамических процессов вносят А.М. Кутепов [48] и Л.П. Холпанов [49], а также др.

исследователи. Эти методы могут быть с успехом использованы для теории диспергирования и механоактивации, осуществляемых в многокомпонентных гетерогенных системах.

Известны работы, в которых математическая модель измельчителя создается на основании представления его как аппарата, обеспечивающего распределение частиц по размерам. В частности, в [50] измельчитель любого типа представляется с помощью модели линейного формирующего фильтра. Уравнение линейного формирующего фильтра представляет собой линейное дифференциальное уравнение первого порядка

$$\dot{R} = -(a + Z(t))R + N(t), \quad (3.43)$$

где R - формируемый случайный процесс, a – параметр системы, $Z(t)$ и $N(t)$ - параметрический и аддитивный случайный «сигналы», являющиеся коррелированными между собой шумами с матожиданиями m_Z, m_N , интенсивностями G_Z, G_N соответственно и взаимной интенсивностью G_{ZN} . Идентифицируя измельчитель с линейным формирующим фильтром, полагали, что случайные функции $Z(t)$ и $N(t)$ характеризуют стохастичность физико-механических свойств измельчаемого материала и воздействий на материал. Тогда для распределения частиц по размерам можно записать уравнение Колмогорова – Фоккера – Планка (КФП):

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left\{ \left[a + m_z - \frac{1}{2} G_Z \right] r + \frac{1}{2} G_{ZN} - m_N \right\} f + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial r^2} \left\{ [G_Z r^2 - 2G_{ZN} r + G_N] f \right\}. \quad (3.44)$$

Далее решение уравнения КФП представляет собой выражение для стационарной плотности вероятности распределенных частиц по размерам.

На основе стохастического подхода автором создана стохастическая модель измельчения и разработан алгоритм оценки параметров полученного решения.

Процесс измельчения сыпучих материалов в помольной камере мельницы довольно сложный и полная модель должна учитывать пульсационную природу движения частиц при соударениях и особенности взаимодействия частиц при столкновениях в газовых высокоскоростных потоках. При построении стохастической модели предлагается процесс перемещения частиц рассматривать как случайное блуждание при диффузии и броуновском движении. В схеме случайных блужданий отдельные шаги крайне малы, но очень быстро следуют друг за другом. В пределе такой процесс будет казаться непрерывным движением, что объясняется наложением многих малых воздействий на частицу. При переходе к пределу получаемые формулы сохраняют смысл и согласуются с физически осмысленными формулами теории диффузии.

Для постановки задачи в рамках теории вероятностей и функционального анализа объект изучения (смесь частиц) должен быть достаточно формализован. Рабочее пространство разбивается на элементарные объемы кубической формы и считается, что частицы находятся в каждом из них. Тогда мгновенная картина состава смеси будет известна. Возьмем один из элементарных объемов, который условно обозначим dV , и определим его материальный состав. Интересующие нас частицы занимают только часть объема, равную mdV ($m < 1$), а остальная часть, равная $(1 - m)dV$, занята газом. Далее рассматриваем только ту часть объема dV , которая занята частицами. Последняя может обладать различными свойствами, т.е. частицы могут отличаться друг от друга крупностью, минеральным составом, скоростью движения и т.д. Все свойства учесть невозможно.

В качестве количественной меры для оценки материального состава рабочего пространства и смеси частиц в нем определена концентрация частиц в элементарном объеме dV в помольной камере. При $dV \rightarrow 0$ получаем состав смеси в окрестности точки $P(x, y, z)$, в которую стягивается объем dV . Это математическая абстракция, которая имеет физический смысл при обволакивании этой точки объемом dV . В общем случае состав смеси в точ-

ке будет зависеть не только от координат (x, y, z) , но и от времени t , так как в помольной камере частицы непрерывно двигаются и состав их в каждой точке непрерывно меняется. Смесь, находящаяся в рабочем пространстве, содержит n компонентов с различными плотностями ρ_i , тогда состояние ее характеризуется n переменными числами c_{pi} - концентрациями отдельных компонентов. Эти числа являются функциями координат и времени, т.е. $c_{pi} = c_i(x, y, z, t)$, так как состав пространства от точки к точке меняется. Введем еще функцию $\gamma(\rho, x, y, z)$ такую, что величина $\gamma d\rho$ равна объемной доле узкой фракции частиц с плотностью в диапазоне от ρ до $\rho + d\rho$ в точке (x, y, z) в момент времени t .

Рассмотрение всех сил, которые действуют на объем частиц при их движении, приводит к интегро-дифференциальному уравнению типа Колмогорова-Фоккера-Планка. Подробное рассмотрение сил, действующих на частицу в среде, состоящей из таких же частиц, рассмотрено в [64-65]. Для простоты рассуждений допустим, что все частицы в среднем увлекаются вдуваемым потоком газа с некоторой постоянной скоростью V_v .

Главная цель разработки и усовершенствования процесса газоструйного измельчения состоит в создании условий, при которых наибольшее количество частиц измельчилось за наименьший период времени до размера, менее заданного. Для математического описания измельчения частицы в камере процесс считается законченным, когда частица вынесена из камеры в классификатор.

По физической картине процесса создана математическая модель с использованием уравнения Колмогорова-Фоккера-Планка относительно концентрации частиц $c(x, y, z, t)$. Эта концентрация является функцией, убывающей вдоль математического ожидания траектории блуждания l , направленной от начального положения частицы в объеме камеры до точки пересечения с вертикальной плоскостью сечения камеры, в которой происходит вынос частицы, либо до точки столкновения данной частицы с другой. Блуж-

дания частицы рассматриваются в выделенном слое с радиусом l_a , равным абсолютному отклонению в подвижной системе координат от траектории детерминированного движения частицы. Этот слой определен для блуждания всего класса частиц данной характеристики крупности x .

При рабочих режимах измельчения (до разгрузки камеры) концентрация частиц довольно высокая, поэтому необходимо рассматривать нелинейные уравнения для моделирования массопереноса в стесненных условиях [66]. В этом случае вводится понятие локальной концентрации частиц в смеси, определяемой как математическое ожидание случайной величины плотности смеси.

Для процесса измельчения частиц в камере нелинейные уравнения массопереноса в случае высококонцентрированных потоков частиц получаем, исходя из следующих соображений. Пусть $c(x, y, z, t)$ – функция концентрации частиц узкого класса крупности в пространстве и времени. Тогда $g(x, y, z, t) = 1 - c(x, y, z, t)$ – доля газовой составляющей. Изменение локальной средней плотности смеси в этом случае выражается как $\bar{\rho} = [1 - c(x, y, z, t)] \cdot \rho_m + c(x, y, z, t) \rho_T$. Здесь ρ_m – средняя плотность смеси газа; ρ_T – плотность частиц твердой фазы. Коэффициент сноса в этом случае будет пропорционален не разности плотностей частиц и газа, как в случае слабо концентрированных смесей, а разности между плотностью частиц и средней плотностью смеси $V = \alpha g(\rho - \rho_m)(1 - c)$, где α – коэффициент сопротивления при обтекании частицы газом, g – ускорение силы тяжести.

Уравнение массопереноса для одномерной задачи получается в виде

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \alpha g(\rho_T - \rho_m)(1 - 2c) \frac{\partial c}{\partial x}.$$

Решение этого уравнения позволяет осуществить аналитическое моделирование процесса измельчения и создать методику нахождения неопределенных параметров модели. Для изменения концентрации частиц в процессе измельчения в зависимости от поставленных граничных условий уравнение Колмогорова–Фоккера–Планка позволяет

получать параметрическое решение либо в явном виде, либо с помощью численного алгоритма [82].

Концентрация частиц с заданным свойством (крупность) x меняется в аппарате по закону, который описывается уравнением диффузии в частных производных. Решение содержит вектор параметров $\bar{\theta}$. Его составляющие в общем случае неизвестны, и они численно оцениваются путем сравнения с экспериментом. Для этого экспериментально определенный остаток помольной камеры $\tilde{\varepsilon}(x)$ частиц крупности x необходимо сравнить с теоретическим значением остатка $\hat{\varepsilon} = \varepsilon(x, \bar{\theta})$, найденным в результате решения уравнения диффузии в смысле некоторой метрики, например

$$\rho = \max_x \left| \frac{\tilde{\varepsilon} - \hat{\varepsilon}}{\hat{\varepsilon}} \right| \quad \text{или} \quad \rho = \max_x |\tilde{\varepsilon} - \hat{\varepsilon}|. \quad \text{Это также может быть сумма квадратов}$$

отклонений от полученного решения или сумма модулей таких отклонений.

Минимизируя $\rho(\bar{\theta})$, находим такие значения вектора параметров $\bar{\theta}^*$, которые обеспечивают минимум функционала $\rho(\bar{\theta})$, то есть $\rho(\bar{\theta}^*) = \min_{\bar{\theta}} \max_x |\tilde{\varepsilon} - \hat{\varepsilon}|$.

Рассмотрим в общем случае плоскость движения частиц, перпендикулярную горизонтальному центральному сечению камеры и направленную вдоль ее длины. Тогда уравнение случайного блуждания вдоль вертикальной оси камеры в этой плоскости, записанное в форме уравнения Колмогорова – Фоккера – Планка относительно концентраций, имеет вид:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial l^2} + V \frac{\partial c}{\partial l}. \quad (3.45)$$

Здесь $c(t, l)$ – значение концентрации частиц в момент времени t в точке траектории блуждания l , D – коэффициент диффузии, V – коэффициент сноса, соответствующий результирующей составляющей скорости частицы. Смесь неоднородна по своим физическим свойствам. Для каждого класса

(или фракции) записывается уравнение случайного блуждания в рабочем объеме со своими условиями прохождения частиц сквозь слой до линии уноса l_a из помольной камеры. Достигнув точки $l - l_a = 0$, частица с вероятностью $1 - p$ отражается от границы слоя (разрушенная после соударения или неизменная, т.к. не произошло соударения) и возвращается к процессу блуждания или с вероятностью p уносится в классификатор, т.е. выходит из процесса блуждания. Отражение происходит от нижней или верхней границы камеры. Таким образом, в общем случае величина l – это величина приближения к точке возможной реализации перехода в новое состояние, т.е. к измельчению частицы до уноса из камеры.

Отражение происходит с вероятностью $1 - p = 1 - p(x)$. Следовательно, условие полного отражения записывается как равенство нулю потока частиц через экран, т.е. $D \frac{\partial c}{\partial l} + Vc = 0$. Условию полного измельчения и уноса соответствует $c = 0$. Это событие происходит с вероятностью p , т.е. с этой вероятностью частица данного класса крупности переходит в новое фазовое состояние, становится принадлежностью смеси газовой среды. Она далее не рассматривается в процессе блуждания.

Поэтому взвешенная сумма этих двух равенств дает граничное условие для дифференциального уравнения (3.45) в частных производных при условии $l - l_a = 0$:

$$(1 - p)(D \frac{\partial c}{\partial t} + Vc) - \mu Vpc = 0, \quad (3.46)$$

где $\mu > 0$ – безразмерный коэффициент.

Решение уравнения (3.45) находится в виде $C(t, l) = H(l) \cdot G(t)$. Эта процедура была представлена в [81] и без учета граничного условия решение получено в виде: $C(t, l) = (C_1 e^{k_1 l} + C_2 e^{k_2 l}) e^{-\lambda t}$. Неопределенные коэффици-

енты найдены из граничных и начальных условий. Затем находится доля продукта $m_x(t)$, остающегося в процессе измельчения по истечении времени t . Это дает возможность найти степень измельчения (остаточное содержание в камере) $\varepsilon(x)$ частицы с характеристикой x

$$s(x) = \frac{\gamma - m_x}{\gamma} = 1 - \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{1}{\lambda_m} \cdot \int_0^{\lambda_m} \left(\int_0^{\infty} H(l) \cdot G(t) dl \right) d\lambda = 1 - \frac{1 - e^{-\lambda_m t}}{\lambda_m t}. \quad (3.47)$$

Обозначим через τ безразмерное время $\tau = V^2 t / 4D$, через $K(x)$ – вспомогательную функцию: $K(x) = \tau \cdot K_1(2 - g)$, $K_1 = \frac{1 - p_m}{p_m} \cdot \frac{p(x)}{1 - p(x)} \theta$, через $f(x)$ промежуточную функцию $f(x) = (1 - e^{-K(x)}) / K(x)$. Тогда остаточное содержание частиц с характеристикой (крупностью) x при заданном фракционном составе частиц находится в виде $\varepsilon(x) = 1 - f(x)$. При этом параметры p_m и k имеют конкретный смысл, связанный с конструктивными и технологическими характеристиками.

Полученные зависимости используются для прогнозирования результатов технологического процесса измельчения и выбора оптимальных режимов измельчения. На практике представляет интерес определение результатов процесса измельчения, в частности, получение измельченных частиц в готовом продукте с фракционным составом $\varepsilon(x)$. Значения $\varepsilon(x)$ могут быть получены экспериментально как функция $\tilde{\varepsilon}(x)$ или теоретически $\hat{\varepsilon}(x)$ решением уравнения.

Для нахождения функции измельчения $\varepsilon(x, \bar{\theta})$, адекватно описывающей процесс, необходимо определить вектор параметров $\bar{\theta}$. Задавая начальный вектор параметров $\bar{\theta}_0$ и используя алгоритм статистической оценки параметров, минимизирующий расхождение между теоретическими и экспериментальными характеристиками технологического процесса измельчения,

можно получить решение с необходимой точностью. Реализация этого алгоритма позволяет быстро находить необходимые значения параметров функции $\varepsilon(x, \bar{\theta})$.

Программная реализация алгоритма поиска с оптимизацией Optimizing.exe позволяет произвести подбор параметров уравнения Колмогорова-Фоккера-Планка, используя оптимизатор. Для опробования созданной математической модели и программы ее реализации использовались данные экспериментальных исследований процесса измельчения песка на газоструйной измельчительной установке УСИ-20. Начальные значения параметров: $\bar{\theta}=0,01$; $L=1,7$; $\tau=18$; $k=0,2$.

Результаты гранулометрического анализа остатков частиц в помольной камере строим в виде экспериментальной кривой $\tilde{\varepsilon}(x)$. На рис. 3.11 приведены экспериментальные (1), расчетные (2) и оптимизированные (3) данные относительного количества частиц каждого класса крупности.

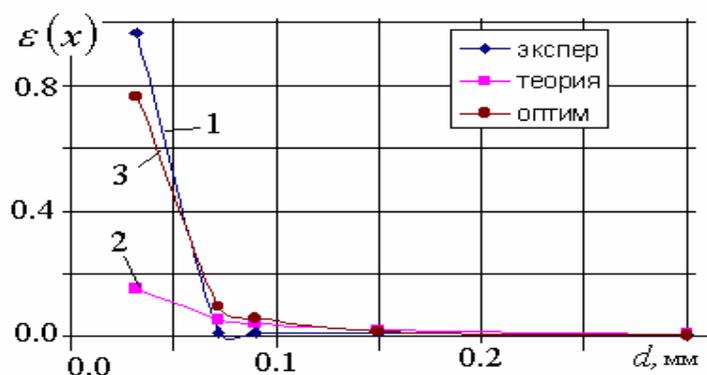


Рисунок 3.11 – Гранулометрические составы продукта измельчения

Оптимальные значения параметров в этом случае равны: $\bar{\theta}=0,15$; $L=0,85$; $\tau=18,7$; $k=0,05$. Результаты расчета функции измельчения приведены в таблице 3.4.

Полученные теоретические результаты удовлетворительно согласуются с результатами экспериментального измельчения материала. Применение оптимизационного алгоритма значительно уменьшает погрешность (до

$\delta \approx 10^{-6}$) и позволяет уточнить необходимые параметры вектора $\bar{\theta}$, используемого для нахождения теоретического решения.

Таблица 3.4

Фракции,	Доля, г	$\varepsilon(x)$	$\bar{\varepsilon}(x)$	$\bar{\varepsilon}_{opt}(x)$
-0,4+0,2	0,21	0,003	0,0046	0,0016
-0,2+0,1	0,73	0,009	0,019	0,014
-0,1+0,08	0,75	0,0094	0,04	0,056
-0,08+0,063	0,84	0,011	0,05	0,092
-0,063	77,33	0,968	0,15	0,765

Разработанный подход к математической модели измельчения сыпучих материалов в помольной камере газоструйной мельницы на основе применения уравнения Колмогорова-Фоккера-Планка описывает принципиальные особенности совместного распределения физических и вещественных признаков частиц смеси и обеспечивает связь различных ее характеристик, позволяет в едином комплексе рассматривать общие закономерности этих распределений во всем диапазоне изменения признаков, включая фазовые переходы процесса измельчения.

Выводы

1. При моделировании рациональных схем замкнутого цикла тонкого измельчения на основе баланса контрольного класса крупности установлена величина удельной производительности по контрольному классу крупности, которая может служить характеристикой мельницы при измельчении данной руды и использоваться для расчета производительности замкнутых циклов измельчения.

2. Критерий повышения эффективности тонкого измельчения в замкнутом цикле основан на взаимосвязи удельной производительности мельницы с режимом классификации по крупности разгрузки мельницы. Производитель-

ность мельницы по готовому продукту в замкнутом цикле измельчения пропорциональна содержанию в мельнице класса крупнее контрольного.

3. На основе динамического моделирования подтверждено, что наибольшая производительность, т. е. наибольшая скорость образования измельченного продукта с определенным гранулометрическим составом при минимальных затратах энергии, будет при минимально возможной для этих условий удельной поверхности и при дискретной загрузке материала.

4. Установлено, что производительность мельницы зависит при прочих равных условиях от соотношения отдельных фракций в общем объеме материала до и после измельчения. На этой базе разработан оптимизационный критерий управления производительностью мельницы на основе контроля гранулометрического состава и определения удельной поверхности продукта.

5. Для вычисления функции распределения частиц по крупности и удельной поверхности материала разработан двухпараметрический алгоритм, параметрами для которого служат показатель кривизны функции распределения n и максимальная крупность материала x_m . Варьируя этими величинами, можно согласовать дисперсность и минимально возможную для нее удельную поверхность, что имеет первостепенное значение для управления процессом измельчения полезных ископаемых с целью снижения энергозатрат.

6. Предложены алгоритмы вычисления крупности частиц при замкнутых циклах измельчения с учетом средних значений классов крупности и выходом продукта определенного мелкого класса крупности. Это позволяет определять распределение по крупности получаемых продуктов во всем диапазоне с учетом требуемого контрольного класса крупности.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ НА БАЗЕ АКУСТОЭМИССИОННОГО МОНИТОРИНГА

4.1 Анализ возможности применения акустоэмиссионной информации для оценки показателей измельчения

Многочисленные исследования процесса микроразрушения материала сжатием и другими видами нагружения [31 - 32] показали, что одним из наиболее чувствительных эффектов, характеризующих микроповреждение, является эффект акустической эмиссии (АЭ). Метод АЭ позволяет для каждого акта образования микротрещины в нагруженном теле зафиксировать время и параметры акустического сигнала, т.е. амплитуду и длительность. Он связан с излучением упругих волн твердым телом вследствие внутренней динамической перестройки его структуры. Было отмечено, что закономерности АЭ наблюдаются при различных видах повреждений: от образования микротрещин при одноосных нагружениях образцов, разрыве волокон композитных материалов до сдвига пластов земной коры и землетрясений [9-10].

Выявлены информативные параметры акустического образа для предразрушающей стадии, которые коррелируют с характеристиками напряженно-деформированного состояния нагружаемого материала. К ним относятся энергетический выход (счет сигналов, отнесенный к работе деформации), активность N (счет сигналов в единицу времени), акустоэмиссионная эффективность процесса разрушения (счет сигналов, приведенный к единице относительной деформации), удельное акустическое излучение, амплитуды сигналов и их распределение по величине, длительность акустического затишья [9].

Модель деформируемого твердого тела и разбиение предразрушающего состояния на три стадии можно применить к процессу тонкого измельчения в замкнутом цикле. Первая стационарная стадия (макродвижение) вклю-

чает загрузку струй материалом, накачку энергией частиц в ходе продвижения двухфазного потока (газа и твердых частиц) в помольную камеру. В результате столкновения в зоне измельчения частицы переходят на вторую стадию разрушения, а затем наступает третья стадия, в результате которой происходит диспергирование частиц. По современным представлениям диспергирование - это процесс разделения деформируемого твердого тела на изолированные отдельности в активных локальных зонах вблизи дефектов структуры по достижении критического (предельного) состояния вещества на неустойчивой авторезонансной стадии предразрушения под действием акустических волн, возникающих при автоколебательном движении атомов в этих зонах. Частицы разрушаются в зоне измельчения полностью до необходимых размеров, удаляются после классификации в циклон готового продукта или разрушаются частично, тогда они поступают после классификации на повторное измельчение. Это особенность измельчения в замкнутом цикле [23]. Из авторезонансной модели диспергирования следует, что информацию об энергетике процесса несет запредельная стадия деформирования и разрушения, в частности, стадия саморазрушения, протекающая со скоростью авторезонанса. В этой связи стадия запредельного деформирования представляется в виде трех составляющих: 1) разрушение с микродиспергированием; 2) саморазрушение с быстрой разгрузкой напряжений и макродиспергированием; 3) разрушение с пластическим деформированием и дроблением.

Первую стадию тонкого измельчения можно рассматривать на основе стохастического подхода, процесс перемещения частиц в помольной камере тогда представляется как случайное блуждание при диффузии и броуновском движении [35]. Вторая и третья стадии разрушения частиц при измельчении являются микроразрушениями, которые необходимо рассматривать с позиций кинетической теории разрушения твердых тел, основы которой сформулированы в работах С.Н. Журкова и др. [10, 36].

Метод акустической эмиссии, как средство акустико-эмиссионного мониторинга, может служить основой исследования разрушения материалов

при тонком измельчении. Но для этого необходимо определить взаимосвязь акустических параметров, АЭ-критериев и режимов, технологических параметров процесса.

Исследования тонкого измельчения проведено на примере струйного измельчения с использованием акустоэмиссионного метода. Для этого создан аппаратный комплекс, заложены основы акустического мониторинга процесса измельчения, разработана методика исследования основных акустических и технологических параметров.

Струйное измельчение, как разновидность тонкого самоизмельчения, относится к высокоскоростным динамическим способам разрушения, в ходе которого возможно измельчить даже пластические материалы. Часть подводимой энергии накапливается материалом в виде его поверхностной и внутренней энергии, величина которой пропорциональна скорости нагружения. В дальнейшем эта энергия используется в ходе последующей переработки тонкодисперсных порошков, однако ее величину точно невозможно определить. Оценить эту энергию можно приблизительно только по вторичным эффектам. Поэтому для оптимизации процесса струйного измельчения применен акустический мониторинг,

Мельницы самоизмельчения относятся к аппаратам с ярко выраженной неоднородностью распределения отдельных элементов потока по времени пребывания. Эти потоки зависят от геометрии мельниц, параметров и условий их работы. В связи с тем, что конструкция мельниц способствует интенсивному перемешиванию твердых тел, по длине мельницы нет сколько-нибудь заметных градиентов свойств материала. Учитывая это, при математическом моделировании структуры потока принимают за основу модель идеального смешения или комбинированную на ее основе.

4.2 Разработка акустоэмиссионной ячеечной модели измельчения

Случайные Марковские процессы по своей физической сущности максимально приспособлены для построения математических моделей кинетики диспергирования и механической активации дисперсных материалов. Существующее многообразие видов Марковских процессов позволяет конструировать разнообразные по сложности и физической сущности модели кинетики диспергирования и механической активации многофазных сред, адекватно отражающие специфический характер нагружения и изменения состояния частиц дисперсной фазы в машинах разного конструктивного оформления. В работах В. Е. Мизонова, С. Ф. Смирнова и других авторов [24, 82] предложена методология применения цепей Маркова к моделированию технологии обработки дисперсных материалов, которая базируется на следующем положении: непрерывное описание эволюции во времени некоторой исследуемой функции представляется через некоторые интервалы времени конечным числом дискретных значений функции, которые называются состоянием системы. В качестве функции могут быть характеристики объекта любой природы. В частности, применительно к сыпучим материалам плотность распределения частиц заменяется вероятностями состояния. Все возможные состояния системы образуют пространство состояний, а их вероятность – вектор состояния. Это дает основание применить цепи Маркова для моделирования процесса измельчения.

Моделирование осуществляется на основе системного подхода с применением ячеечной модели. При моделировании процесса измельчения в мельнице, работающей в периодическом режиме (периодическая загрузка материала), в качестве элементарного объема моделирования принимается вся мельница. Для описания состояния материала и режима измельчения используются сигналы, записываемые датчиком при непрерывном акустическом мониторинге.

Ранее проведенные исследования позволили установить связь характеристик акустических сигналов (АС), записываемых в процессе разных видов нагружения материалов, с технологическими параметрами и свойствами исходного материала [83 – 84]. Это дает возможность говорить о том, что режим процесса измельчения и состояние измельчаемого материала определяется величиной амплитуды АС и их числом в наблюдаемый период времени. Поэтому математическая модель основана на анализе амплитуды акустических сигналов, записанных в каждый дискретный момент времени Δt процесса измельчения.

Для создания ячеечной модели весь диапазон акустических сигналов разбивается на поддиапазоны сигналов со средними размерами амплитуды $A_i, i = 1, 2, \dots, m$, где $i = 1$ соответствует A_{max} . Таким образом, все акустические сигналы, записываемые в ходе мониторинга, разбиваются на m ячеек по размерам их амплитуд. Число сигналов с соответствующими амплитудами определяет состояние элементарной ячейки. Количество АС может быть представлено вектором столбцом $N = (n_i), i = 1, \dots, m$, где n_i - число АС i ячейки, т.е. число сигналов, имеющих амплитуду A_i .

Каждое состояние характеризуется определенной вероятностью, которая может рассматриваться как доля сигналов соответствующей амплитуды A_i , а также рассматриваться как безразмерное число сигналов. Переход к нормированному распределению числа АС в каждой ячейке при любом разбиении на классы реализуется по формуле:

$$n_i^k = \frac{n_i}{\sum_1^m n_i} = \frac{n_i}{N}, \quad (4.1)$$

где N – число зарегистрированных АС за интервал наблюдения, i – номер ячейки, k – дискретный момент времени наблюдения.

При моделировании кинетики измельчения процесс рассматривается как последовательность малых промежутков времени Δt - времени перехода. В этом случае текущие моменты времени процесса и записи акустического

мониторинга будут определяться как $t_k = k\Delta t$, где целое число $k = 1, 2, \dots$ - номер перехода. Его можно рассматривать как дискретный текущий момент времени.

За k -й переход вектор состояния N^k перейдет в N^{k+1} . Этот переход обусловлен различными событиями, которые происходят внутри каждой ячейки: прямое столкновение частиц и их касание, разрушение крупных частиц на более мелкие и отламывание осколков, появление трещин в крупных частицах и т.д. В результате измельчения частицы становятся меньше и, соответственно, амплитуды измеряемых АС – меньше. Таким образом, $(k + 1)$ -состояние первых двух ячеек (с наибольшими амплитудами) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} n_1^{k+1} &= g_{11}n_1^k + 0 \cdot n_2^k + \dots + 0 \\ n_2^{k+1} &= g_{21}n_1^k + g_{22}n_2^k + \dots + 0 \end{aligned} \quad (4.2)$$

где g_{11} - доля сигналов 1 ячейки, оставшейся в ней; g_{21} - доля сигналов 1 ячейки, перешедших во 2 ячейку, g_{22} - доля сигналов 2 ячейки, оставшейся в ней. При этом значения g_{ij} трактуются как вероятности перехода в другие ячейки. Эти коэффициенты образуют треугольную матрицу вероятностей перехода при измельчении, или матрицу измельчения [82]

$$G = \begin{bmatrix} g_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ g_{21} & g_{22} & 0 & \dots & 0 \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} & \dots & 0 \\ \dots & & & & \\ g_{m1} & g_{m2} & g_{m3} & \dots & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.3)$$

Из условия нормировки (4.1) следует, что вне зависимости от степени

изменения сигналов, должно выполняться условие $\sum_{k=1}^l \sum_{i=1}^m g_{ik} = 1$.

Основной математической модели процесса измельчения является определение матрицы измельчения G . В теории измельчения для этого используют селективную и распределительную функции измельчения [80].

Селективная функция измельчения описывает скорость измельчения. В нашем случае селективная скорость $S(A)$ описывает скорость уменьшения в единицу времени количества сигналов с величиной амплитуды, попадающей в ячейку (поддиапазон) A_j . Таким образом, $\Delta n_i^- = n_i S_i \Delta t$.

Сигналы с пониженным уровнем амплитуды переходят в соседние ячейки, где находятся записанные сигналы с меньшими амплитудами. Этот процесс описывается распределительной функцией b_{ij} , которая показывает вероятность перехода сигналов из j -ой ячейки в i -ую. Тогда процесс измельчения приводит к увеличению числа записанных в дискретный момент времени сигналов и помещенных в ячейке с меньшими амплитудами на величину $\Delta n_i^+ = \sum_j b_{ij} n_j S_j \Delta t$.

Таким образом, при периодической загрузке материала в мельницу матрица измельчения, основанная на записанных сигналах акустического мониторинга процесса, имеет вид:

$$G = \begin{bmatrix} 1 - S_1 \Delta t & 0 & \dots & 0 \\ S_1 b_{21} \Delta t & 1 - S_2 \Delta t & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_1 b_{m1} \Delta t & S_2 b_{m2} \Delta t & \dots & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ g_{21} & g_{22} & 0 & \dots & 0 \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{m1} & g_{m2} & g_{m3} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4).$$

Система работает следующим образом. Загрузка материала на начальном этапе дает сигналы с относительно повышенной амплитудой. Пусть начальные значения классов амплитуд были выражены вектором столбцом:

$A_n^o = (A_{n1}^0 \ A_{n2}^0 \ \dots \ A_{nm}^0)^T$, где индекс T обозначает транспонирование. В начальный момент $k = 0$ считаем

$$A^0 = A_n^0. \quad (4.5)$$

Тогда изменение амплитуды записанных сигналов в ходе измельчения за шаг времени перехода по ячеечной модели вычисляется из матричного равенства

$$A^{k+1} = GA^k \quad (4.6)$$

Число переходов k вычисляется из выражения $k = t/\Delta t$, где t – дискретное время пребывания материала в мельнице.

Таким образом, задача определения кинетики периодического измельчения решена на основе ячеечной модели акустического мониторинга процесса. Осталось определить матрицу измельчения.

Возможны два пути решения этой проблемы: определение селективной и разделительной функции через величину энергии, поступающей к материалу и связанной с энергией АС или проведение экспериментального восстановления матрицы измельчения по результатам акустического мониторинга.

В данной работе рассмотрен первый вариант. В теории сигналов [56] используется определение удельной энергии и средней удельной мощности сигналов, записанных за данный промежуток времени t , в виде:

$$E_A = \int_0^t s^2(t)dt, \quad P_A = \frac{1}{t} \int_0^t s^2 dt, \quad (4.7)$$

где мощность записываемых сигналов P_A имеет размерность B^2 .

В дискретном представлении энергия акустической эмиссии при разрушении частиц определяется формулой $E_A = \sum_{i=1}^m n_i A_i^2$, где n_i, A_i - соответственно число сигналов и средняя амплитуда i ячейки. Разрушение частиц, при котором появляются сигналы с амплитудой A_i , происходит при обладании сигналами удельной мощности энергии $P_A = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^m n_i A_i^2$. Тогда для описания тонкого измельчения на основе записанных в ходе мониторинга акустических сигналов матрица измельчения имеет вид:

$$G = \begin{bmatrix} P_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ P_{21} & P_{22} & 0 & \dots & 0 \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & \dots & 0 \\ \dots & & & & \\ P_{m1} & P_{m2} & P_{m3} & \dots & 1 \end{bmatrix}, \quad (4.8)$$

где $P_{i,j}$ - величина удельной мощности сигнала в каждой i ячейке (т.е. поддиапазоне сигналов с величиной амплитуды A_i на j переходе).

Сравнивая (4.4) и (4.8), получаем выражение для определения селективной и распределительной функции измельчения

$$S_i = \frac{1 - P_{i,j}}{\Delta t}, \quad b_{k,i} = \frac{P_{k,i}}{S_i \Delta t} \quad (4.9)$$

Для проведения апробации математической модели использовались результаты акустического мониторинга процесса измельчения кварцевого песка Вольногорского горнометаллургического завода (ВГМК). На рис. 4.1 представлен гранулометрический состав исходного материала (1), измельченного продукта (3 - продукт циклона) и недоизмельченного материала, оставшегося в помольной камере (2 - ОПК).

Установлено [85], что распределение амплитуд АС на стадии загрузки может служить характеристикой крупности исходного материала, тогда как параметр A_{\max} на стадии разгрузки струй может служить оценкой характерных размеров частиц циркулирующей нагрузки мельницы (возврата некондиционных частиц из классификатора в инжекторы).

Проверка модели проводилась на примере струйного измельчения кварцевого песка. Измельчение реализовано при давлении $P = 0,3$ МПа, режиме классификации $n = 2000$ мин⁻¹. Частота регистрации сигналов – 400 кГц.

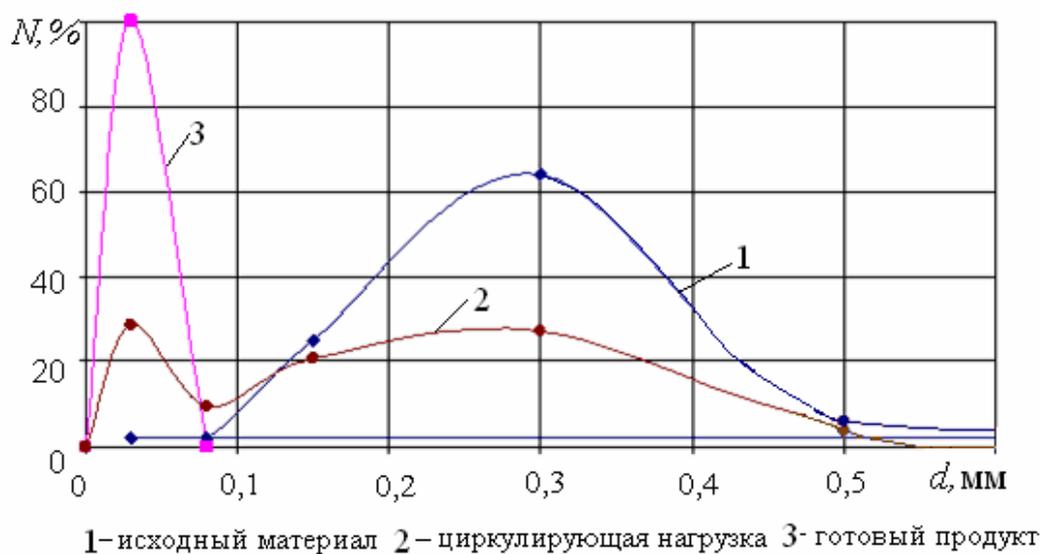


Рисунок 4.1 – Гранулометрический состав исходного и измельченного кварцевого песка

Для анализа сигналов выбирался временной интервал $t = 0,01$ с, рассматривались сигналы с амплитудой более 10 мВ. На рис. 4.2 представлено распределение амплитуд акустических сигналов на различных режимах измельчения кварцевого песка, полученное расчетным путем на основании математической модели по формулам (4.6 – 4.8).

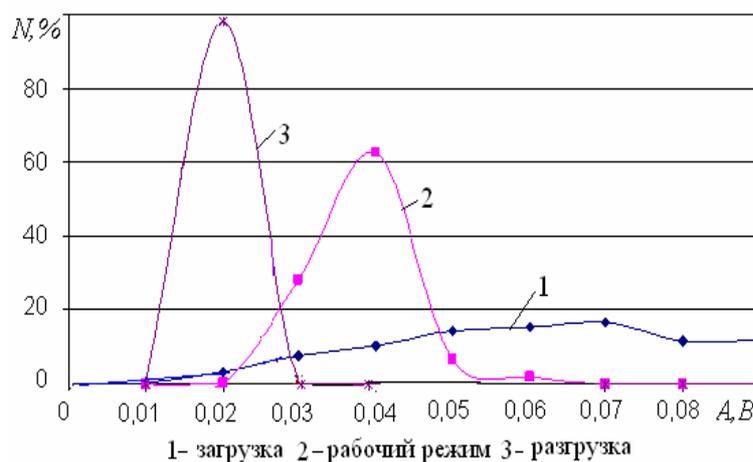


Рисунок 4.2 – Расчетное распределение амплитуд акустических сигналов

Полученные результаты апробации математической модели согласуются с установленными далее связями акустических сигналов и дисперсностью получаемого продукта при струйном измельчении. Исследованиями установлено, что для получения информации о характерных размерах частиц в струе, их гранулометрическом составе, степени загрузки струй материалом целесообразно использовать характеристики акустического излучения при струйном измельчении: активность \dot{N} АС, амплитуды сигналов и их распределение по величине. Это возможно успешно реализовать на основе созданной ячейной модели акустического мониторинга процесса тонкого измельчения.

Таким образом, для контроля процесса тонкого измельчения и выбора оптимальных технологических параметров необходимо использовать моделирование и акустический мониторинг процесса. Для оптимизации струйного измельчения, как одного из наиболее динамичных видов измельчения и наиболее пригодного для акустического исследования, была разработана методика и аппаратная база акустоэмиссионного мониторинга.

4.3 Создание аппаратной базы и методики акустического мониторинга струйного измельчения

Экспериментальные исследования проводились в лабораторных газоструйных мельницах двух типоразмеров: УСИ-02, производительностью 0,2 кг/ч (рис. 4.3) и УСИ-20 производительностью $Q = 20$ кг/ч, общий вид которой приведен на рисунке 4.4



Рисунок 4.3 – Струйная измельчительная установка УСИ-02

На рис. 4.3 – 4.5 обозначения совпадают: 1– загрузочный бункер, 2 – помольная камера, 3 – акустический датчик с волноводом, 4 – классификатор, 5 – возврат материала, 6 – циклон, 7 – бункер готового продукта

При исследовании процесса измельчения использовались различные материалы по своим физическим свойствам: кварцевый песок, шамот, шлак, цирконовый концентрат, известняк, уголь. Крупность материала составляла от 0,1 до 3мм.

Из загрузочного бункера (1) материал подается в мельницу. Две

встречные струи энергоносителя, захватывая частицы материала в инжекторной системе, переносят их через разгонные трубки в зону измельчения (2). В зоне струйного измельчения частицы сталкиваются, разрушаются до необходимых размеров полностью или частично, затем удаляются восходящим потоком из камеры в классификатор (4), откуда готовый по крупности продукт осаждается в циклоне (6) и выгружается из бункера готовой продукции (7). Некондиционные по крупности фракции поступают из классификатора по трубкам возврата (5) на повторное измельчение.

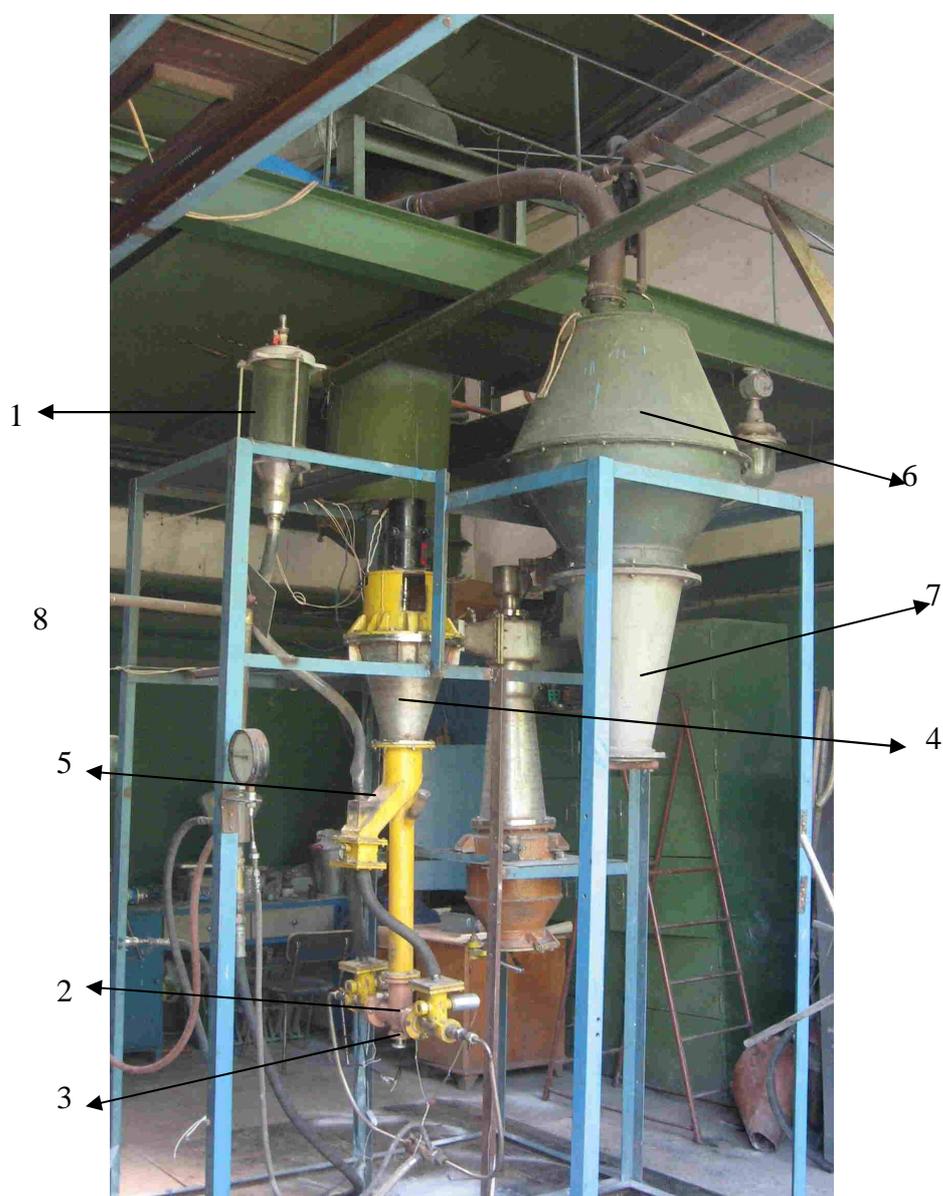


Рисунок 4.4 – Общий вид исследовательского комплекса УСИ-20

Таким образом, реализуется замкнутый цикл измельчения с внутренней классификацией. Общая схема струйной измельчительной установки с акустическими датчиками представлена на рис. 4.5.

Разрушение частиц в процессе струйного измельчения сыпучего материала можно представить как преобразование случайных микрповреждений в некоторый регулярный процесс. Для этого необходимо рассматривать взаимосвязь моделей двух уровней: микроуровня (микрповреждение), на котором разрушение связей между элементами материала носит стохастический характер, и макроуровня (измельчение материала), определяющего процесс измельчения частиц в потоке энергоносителя. При столкновении частицы накачиваются энергией от энергоносителя, подвергаются ударам и, наконец, диспергируют. При этом аппаратура фиксирует акустические сигналы. Диспергирование является завершающим актом разрушения. В его эффектах проявляются все детали механизма разрушения, включая образование и развитие трещин.

Для регистрации акустических сигналов, возникающих при разрушении, волноводы устанавливались в двух зонах – внутри помольной камеры и на выходе из классификатора.

Для создания акустической измерительной системы использовался латунный волновод, диаметр которого соответствовал датчику приема АС. Датчик – пьезокерамический широкополосный. При записи акустических сигналов использовались датчики GT-200 и П 113, работающие на прямом пьезоэлектрическом эффекте, т.к. такие датчики используются для измерений быстро протекающих динамических процессов. Датчики соединены с аналого-цифровым преобразователем (АЦП) и далее с компьютером. При экспериментальных исследованиях использовался АЦП Е 14-440 (ЗАО «Л-КАРД» www.lcard.ru) с внутренней платой L-Card. Запись и расшифровка сигналов основывались на программе ПО «Power Graph» (ООО «Интероптика», www.powergraph.ru).

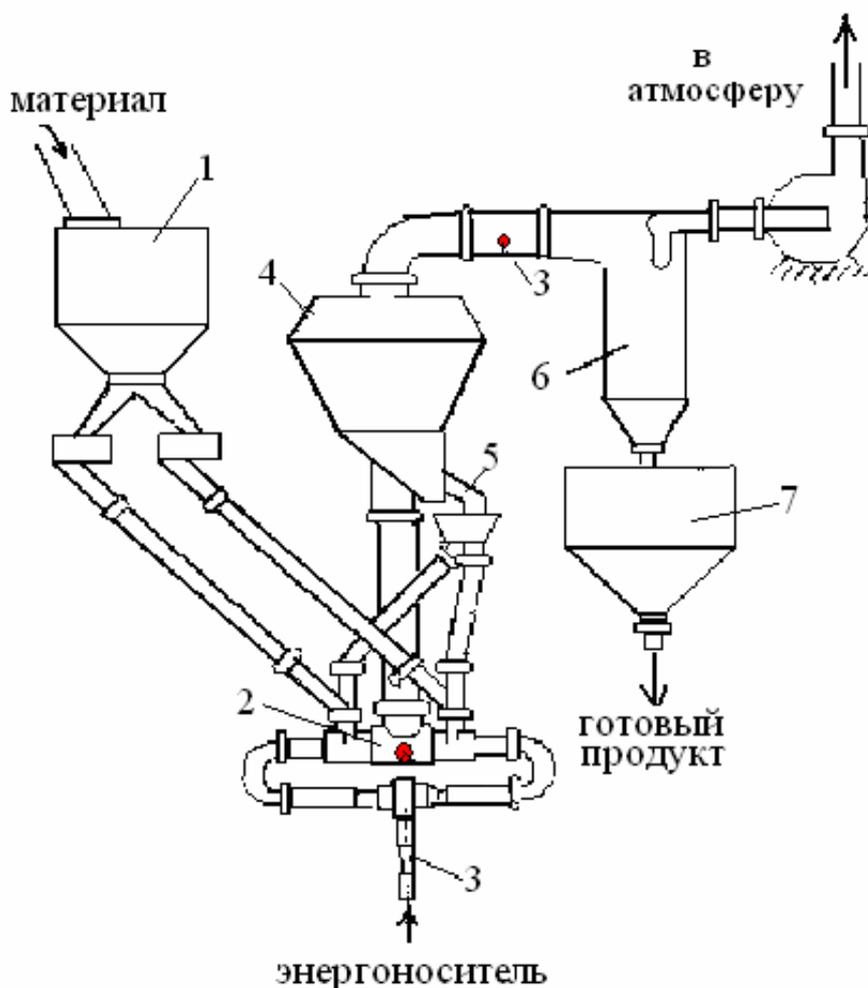


Рисунок 4.5 – Схема струйной измельчительной установки с датчиками для акустического мониторинга

Один конец латунного волновода вводился через сальниковое устройство, обеспечивающее звуковую изоляцию от корпуса, внутрь помольной камеры на различную глубину зоны помола. Второй конец волновода был состыкован с датчиком сигналов акустической эмиссии.

На рис. 4.4 показана схема аппаратной базы акустического мониторинга. Параметры датчиков приведены в таблице 4.1

Таким образом, система записи и обработки АС включала: волноводы, соединенные с датчиками и установленные в помольной камере и в трубопроводе на выходе из классификатора; аналого-цифровой преобразователь (АЦП), соединенный с компьютером.

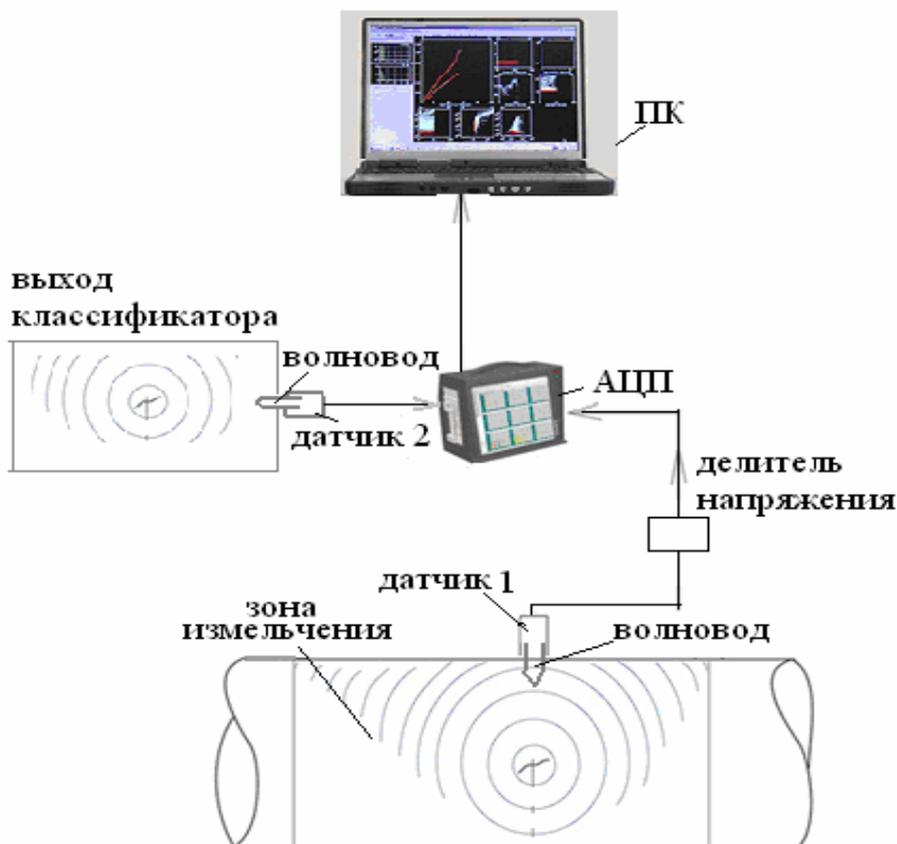


Рисунок 4.6 – Схема аппаратной базы акустического мониторинга

Таблица 4.1 – Характеристики используемых датчиков

Преобразователи АС	Диапазон частот, кГц	Коэффициент преобразования	Изготовитель
GT- 200	130 – 200	60 дБ отн. 1 В/м/с	ООО «ГлобалТест», г. Саров, Нижегородская обл., Россия
П 113	20 – 200	$(3,0 \cdot 10^9)$ В/м	НИИ неразрушающего контроля, г. Кишинев, Молдова,

Частота регистрации менялась от 10 кГц до 400 кГц. Поскольку величина амплитудно-частотных характеристик сигналов, записываемых двумя датчиками, значительно отличалась, то в систему измерения подключался делитель напряжения, позволяющий использовать заданный коэффициент уменьшения величины амплитуды АС, фиксируемых в зоне измельчения.

Разработанная аппаратная часть выполняла три функции: фиксирование сигналов акустической эмиссии, преобразование их в цифровую форму и передачу данных в компьютер. Дальнейшая первичная обработка и анализ информации проводились на основе программного обеспечения «Power Graph» (версии 3.8). Эта программа позволила управлять устройствами и процессом регистрации, накопления, хранения и визуализации данных, редактирования, обработки и анализа сигналов.

На основе имеющихся аппаратных средств разработана методика регистрации и анализа акустических параметров, технологических и режимных характеристик процесса газоструйного измельчения. В число изучаемых технологических параметров внесено начальное давление сжатого воздуха (перед истечением из сопла), частота вращения ротора классификатора, степень загрузки струй материалом, характеризующаясь четырьмя режимами: загрузкой струй материалом, рабочим режимом измельчения, разгрузкой зоны измельчения и перегрузкой струй материалом. Как было показано [86], наиболее информативными параметрами акустического мониторинга являются скорость счета (или активность АЭ) \dot{N} , суммарный счет импульсов N_{Σ} за выбранный промежуток времени, максимальная амплитуда АС и ее распределение по величине.

Методика регистрации экспериментальных данных акустического мониторинга зоны измельчения состояла в следующем. На различных стадиях заполнения помольной камеры материалом измерялось общее число N_{Σ} АС различных амплитуд. Период измерения АС для анализа составлял 1 с, период регистрации – 0,1 с. Далее определялось число N_x сигналов, характеризующих режим истечения струй без подачи материала в мельницу, т.е. фоновый шум – режим «холостого» хода процесса. Амплитуды АС струи, не содержащей материал, составляют менее 0,01 В в зависимости от начального давления энергоносителя ($P = 0,2 - 0,5$ МПа). Полагалось, что величина активности $\dot{N} = (N_{\Sigma} - N_x) / \tau$ (имп/с) акустического излучения характеризует, по сути, ре-

альное число сигналов акустической эмиссии при соударении частиц и их разрушении, поскольку из общего счета N_{Σ} АС исключается фоновый шум N_x струи энергоносителя.

При оценке амплитуд устанавливались максимальная A_{\max} и средняя величина амплитуды $A_{\text{ср}}$ АС. При этом учитывались сигналы с долевым участием более 1%. Средняя амплитуда $A_{\text{ср}}$ принималась равной амплитудам сигналов, активность которых была порядка 50% и вычислялась, как средневзвешенный полуразмах записанной амплитуды АС для временного интервала в одну секунду. Для определения минимальной амплитуды сигналов рассматривались сигналы без «шума», т.е. исключались сигналы с амплитудой порядка 0,01 В.

Дисперсность готового продукта оценивалась по величине S_{y0} удельной поверхности и содержанию узких наиболее тонких фракций $\beta_{-10}, \beta_{-5}, \beta_{-3}, \beta_{-1}$, соответственно менее 10, 5, 3, 1 мкм, с использованием приборов Т-3 Товара и фирмы «MALVERN».

Для мониторинга измельченного продукта применяли второй комплекс аппаратуры, установленный на выходе классификатора (см. рис. 4.5 и 4.6).

4.4 Анализ акустических характеристик режимов работы мельниц различного типоразмера

Исходя из физической сути процесса струйного измельчения, были выделены и изучены четыре режима. Начало загрузки струй материалом характеризует режим 1, в котором ускорение частиц и их взаимные соударения происходят в условиях высокой концентрации частиц твердой фазы в струе и при относительно низких скоростях разрушения (механизм динамичного истирания). По мере удаления частиц из газовой взвеси (через систему классификации в циклон и фильтр) уменьшается насыщенность струй твердой фазой, измельчение становится устойчивым и более эффективным за счет перехода к оптимальным концентрациям и более высокой скорости разрушения частиц

(механизм высокоскоростного удара). Это оптимальный рабочий режим 2. Далее, если не производится подача материала в струю, процесс переходит в режим разгрузки - режим 3 - с сохраняющейся достаточно высокой скоростью разрушения частиц ударами, но недостаточной концентрацией твердой фазы. В этом режиме измельчение происходит уже недостаточно эффективно из-за пониженной вероятности встречных ударов частиц в зоне помола. В процессе измельчения возможен режим 4 - режим перегрузки струй материалом, за которым может наступить “завал” помольной камеры в результате уменьшения относительной скорости разгона и разрушения частиц. В этом режиме наблюдается резкое снижение эффективности измельчения и производительности мельницы.

Исследования позволили установить связь акустических параметров с режимами измельчения (см. рис. 4.7).

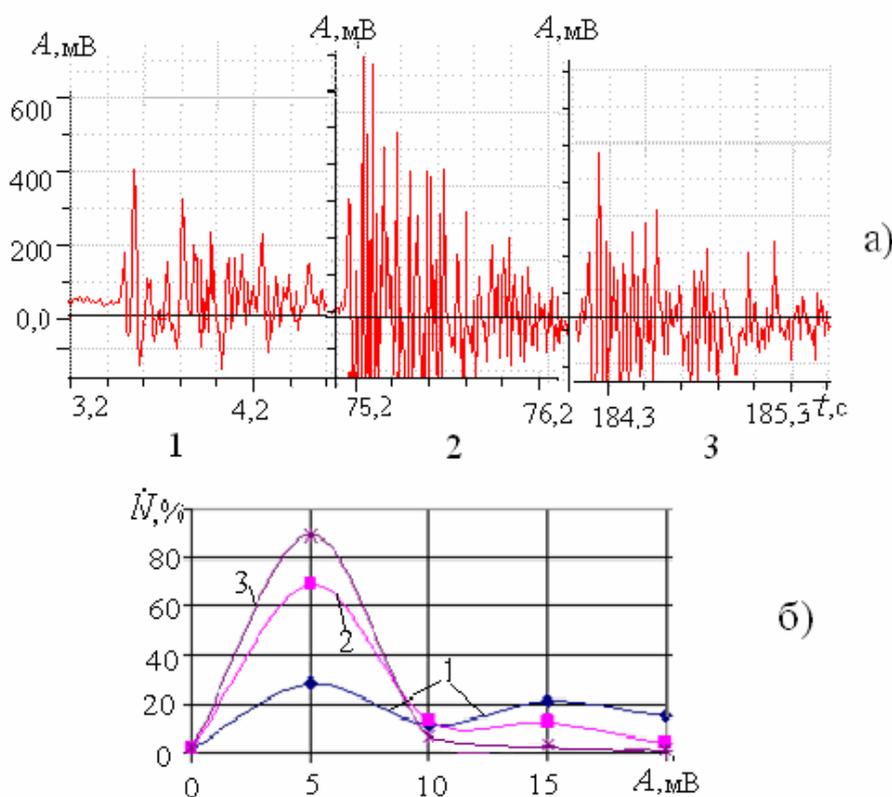


Рисунок 4.7 – Изменение амплитуд (а) и активности (б) акустических сигналов в зоне измельчения шамота на различных стадиях процесса: 1 – подача материала, 2 – рабочий режим, 3 – разгрузка.

Изменение режима процесса струйного измельчения, включая подачу в струю материала, различные состояния струй по содержанию твердой фазы и динамичности разрушения частиц, обуславливают изменения амплитудных распределений и акустических сигналов в зоне помола. На рис. 4.8 показаны амплитудные характеристики АС в разных режимах загрузки лабораторной установки при измельчении шамота.

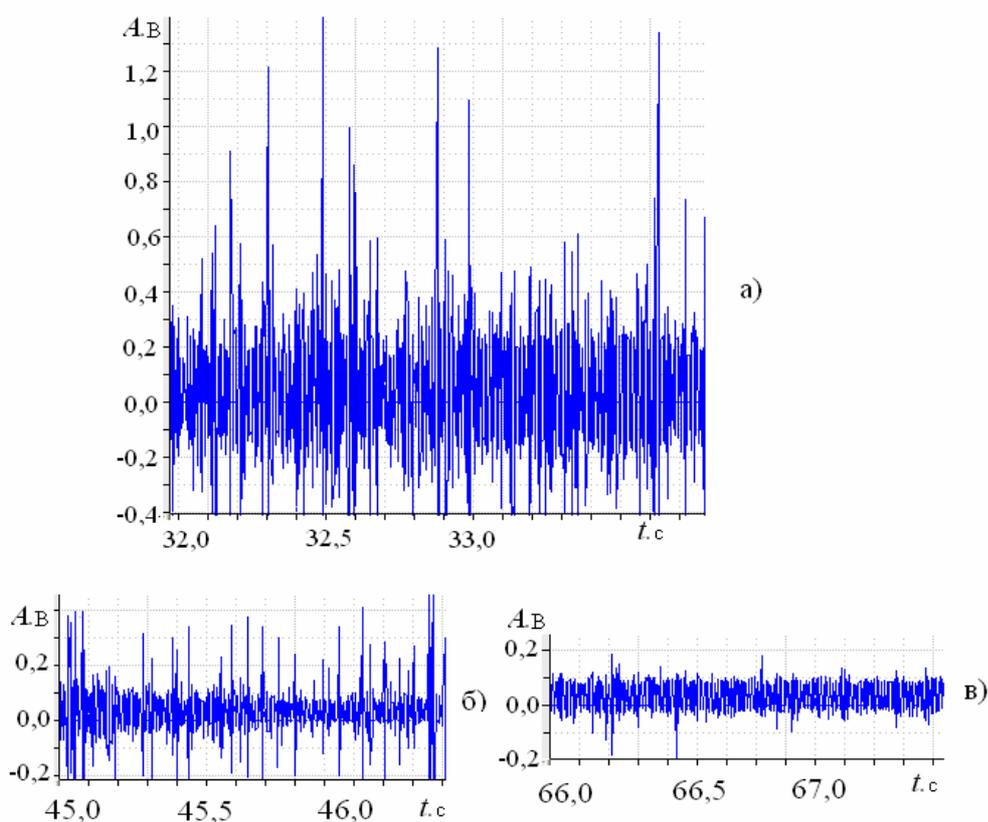


Рисунок 4.8 – Изменение амплитуд акустических сигналов в зоне измельчения шамота на различных стадиях процесса: а) подача материала; б) рабочий режим; в) разгрузка струй.

Экспериментально установлено, что акустические сигналы в предельных относительно эффективности измельчения режимах загрузки струй материалом (разгрузка струй и “завал”) имеют различия по максимальной амплитуде АС в зоне измельчения до нескольких порядков. Это прослеживается амплитудными характеристиками АС при измельчении в лабораторной и

промышленной установках.

Важным акустическим параметром является активность акустических сигналов, т.е. число сигналов в единицу времени. Исследованиями показано, что повышение уровня акустической активности зоны помола на любой стадии является фактором роста числа ударов частиц и, следовательно, интенсификации измельчения и увеличения производительности мельницы.

Режимы загрузки струйной мельницы материалом могут различаться: одноразовая и многократная (с дозагрузкой), непрерывная и периодическая. Исследования показали, что производительность измельчения зависит от своевременности и оптимальности загрузки струй материалом.

На рис. 4.9 показано влияние режима загрузки струй на производительность мельницы. Подача порций исходного материала обозначена стрелками; при этом пунктир относится к графику 1; сплошная линия – к графику 2. Параметры энергоносителя, режим классификации, крупность исходного материала во всех опытах поддерживались на неизменном уровне. При измельчении шамота дозагрузку мельницы производили регулярно через каждые три минуты от начала каждого цикла загрузки. Производительность измерялась каждые две минуты. Более высокая производительность наблюдалась при регулярной дозагрузке, но не превышала в оптимальном режиме (кривая 1) 12 кг/ч при измельчении шамота (а) и 13 кг/ч при измельчении шлака (б).

При условии загрузки исходного материала возможен также режим с некоторой перегрузкой струй, за которым может наступить недопустимый аварийный режим «завала» помольной камеры. В последнем случае в системе мельницы вместо измельчения может происходить непрерывная или пульсирующая пневмотранспортировка твердой фазы в струе с падением производительности и длительным восстановлением (после отключения подачи материала) нормального рабочего режима измельчения (кривые 2 на рис. 4.7 а, б).

Установлено (рис. 4.9), что явление перегрузки струй приводит к задержке выхода мельницы на максимальную производительность и к сниже-

нию ее средней производительности за исследуемый интервал времени. При непрерывной загрузке мельницы происходит либо недогрузка, что ведет к снижению производительности относительно максимальной величины, либо перегрузка свежим материалом, т.к. циркулирующая нагрузка уменьшается неравномерно, по мере достижения нужной дисперсности продукта, проходящего через классификатор. Только при контроле уровня загрузки мельницы с учетом циркулирующей нагрузки можно достичь максимальной (оптимальной) производительности.

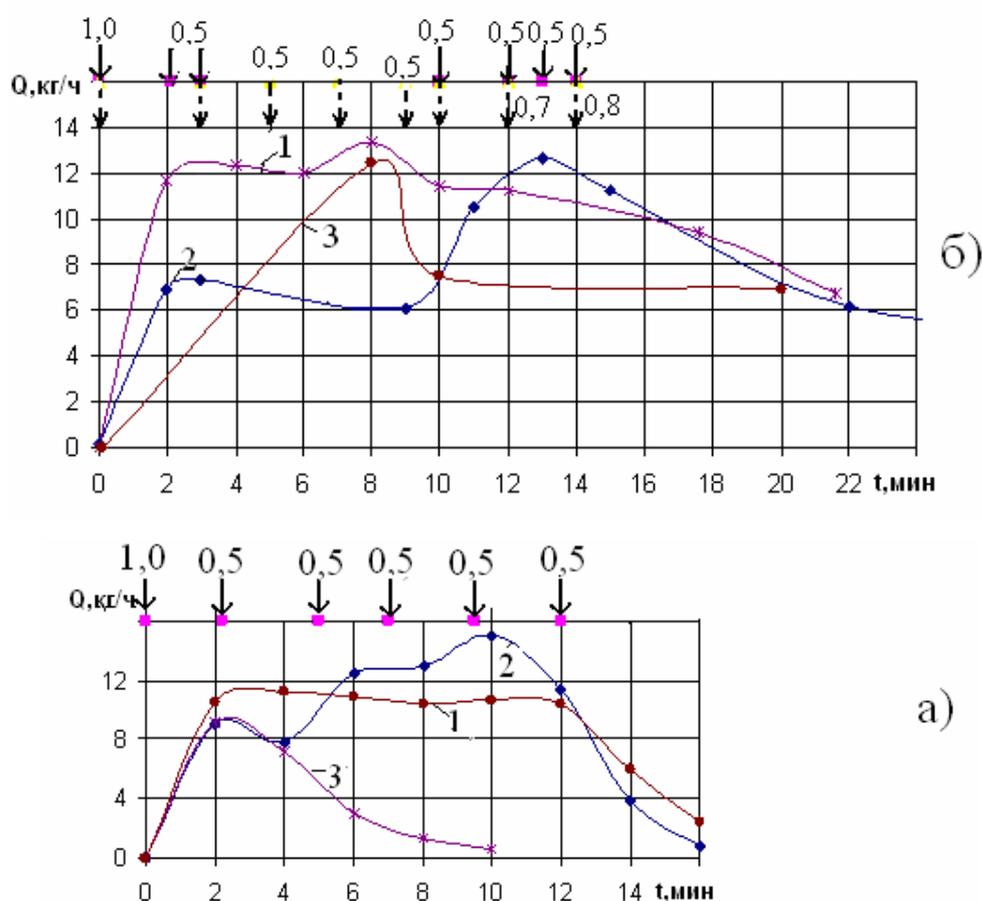


Рисунок 4.9 – Зависимость производительности Q мельницы от загрузки струй материалом: а) – шамота, б) – шлака, где \downarrow – моменты загрузки материала; 1 – оптимальный режим загрузки струй материалом; 2 – режим с перегрузкой мельницы; 3 – режим без догрузки

Контроль загрузки мельницы можно проводить различными методами. В данной работе предлагается использовать акустический мониторинг процесса измельчения. В ходе акустического мониторинга струйной мельницы решалась задача установления связей загрузки струй материалом и производительности мельницы с акустическими параметрами при измельчении твердых сыпучих материалов. Анализ экспериментальных данных показал, что с началом разгрузки струй наблюдается уменьшение активности АЭ и величины средней и максимальной амплитуды АС. Эти факторы являются причиной наблюдаемого уменьшения производительности мельницы.

В таблице 4.2 приведены экспериментальные данные, показывающие изменение производительности мельницы Q и параметров акустического излучения зоны помола при измельчении шамота (рис. 4.7 а) в различных режимах заполнения струй материалом : активности \dot{N} акустического излучения и амплитуд $A_{\text{ср}}$, $A_{\text{макс}}$

Анализ экспериментальных данных показал, что с началом разгрузки струй наблюдается уменьшение активности АЭ и величины средней и максимальной амплитуды АС (см. рис. 4.7 в и табл. 4.1). Этот результат объясняется тем, что с течением времени измельчения (без дозагрузки порций материала) уменьшается крупность частиц циркулирующей нагрузки (возврата продукта классификатора в инжекторы), одновременно снижается вероятность соударений частиц из-за уноса части измельченного продукта в циклон. Эти факторы являются причиной наблюдаемого уменьшения производительности мельницы.

На рисунке 4.10 приведены опытные данные, позволяющие сформулировать связь активности \dot{N} акустического излучения с производительностью мельницы в рабочих режимах измельчения: $\lg \dot{N} = 0,02 Q + 4,9$, \dot{N}, c^{-1} ; $Q, кг/ч$, коэффициент корреляции $r = 0,66$. Колебания степени заполнения струй материалом влекут изменение числа АС и приводят к начальному варьированию производительности мельницы в диапазоне 2 – 12 кг/ч.

Таблица 4.2 –Производительность струйной мельницы и акустические параметры в различных режимах загрузки струй при измельчении шамота

$t_{\text{текущ}}, \text{МИН}$	$Q, \text{КГ/Ч}$	$\dot{N} \cdot 10^5 \text{С}^{-1}$	$A_{\text{ср}}, \text{В}$	$A_{\text{макс}}, \text{В}$
Загрузка однократная $Q_{\text{ср}} = 6,4 \text{ кг/ч}$, график 3				
0,1	–	1,56	2	6,5
2	9,15	0,96	1,5	4,5
4	7,2	0,94	0,46	2,5
6	3,0	0,46	0,22	0,6
8	1,35	0,75	0,2	0,5
10	0,6	0,18	0,1	0,4
Загрузка многократная с одной перегрузкой $Q_{\text{ср}} = 8,4 \text{ кг/ч}$, график 2				
0,1	–	0,86	2,5	6
2	9,0	1,75	1	3
4	6,24	1,29	1	4,5
6	12,45	1,30	1,5	4
8	12,6	1,60	1,4	4
10	15,0	1,79	1,2	4
12	3,9	1,45	1,5	4
14	0,9	0,45	0,7	2,5
Загрузка многократная (оптимальная) $Q_{\text{ср}} = 8,5 \text{ кг/ч}$, график 1				
0,1	-	1,95	1,5	4,0
2	10,5	1,2	1,0	2,75
4	11,25	1,8	1,2	3,5
6	10,86	1,0	1,3	4,2
8	10,35	1,1	1,1	3,6
10	10,65	1,3	1,3	4,5
12	10,35	0,5	1,1	4,4
14	6,0	0,4	0,4	2,5
16	2,4	0,14	0,2	1,5

При этом максимальной эффективности измельчения шамота соответствует максимальная акустическая активность на уровне $\dot{N} = 10^{5,2}$.

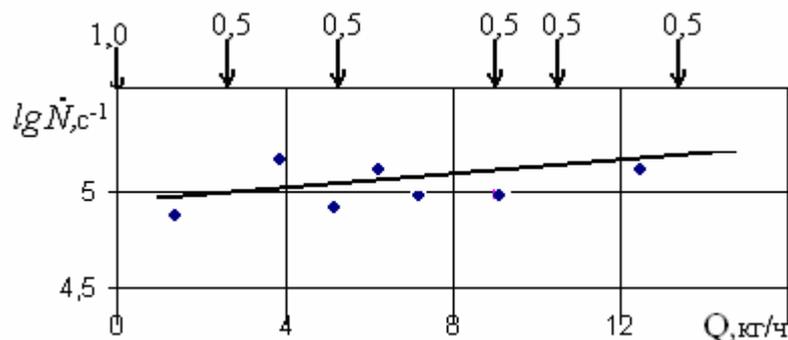


Рисунок 4.10 – Зависимость активности \dot{N} АЭ от производительности мельницы Q в рабочих режимах измельчения шамота.

На рисунке 4.11 сопоставлены во времени изменения производительности Q мельницы, акустической активности \dot{N} зоны помола и характерной (преимущественной) A_{cp} амплитуды АС. Анализ показал, что максимальные уровни производительности мельницы $Q = 4 - 5,5$ г/с соответствуют высокой акустической активности $\lg \dot{N} = 4,5 - 4,7$, тогда как в других, менее эффективных режимах измельчения ($Q = 2,5 - 3,5$ г/с) наблюдается ослабленное акустическое излучение: $\lg \dot{N} = 3,5 - 3,7$.

На рис. 4.12 показано изменение акустической активности \dot{N} зон помола для установок различного типоразмера с изменением диапазона малоамплитудных сигналов. Проявляется закономерность накопления АС (с 30-50 до 80-90 %) минимальной амплитуды (для циркона - менее 5 мВ) к моменту завершения измельчения и разгрузки струй. С получением такой информации о начале разгрузки струй для продолжения измельчения следует произвести дозагрузку новой порции материала.

Исследования показали связь загрузки струй твердой фазой и производительности мельницы с акустическими параметрами излучения.

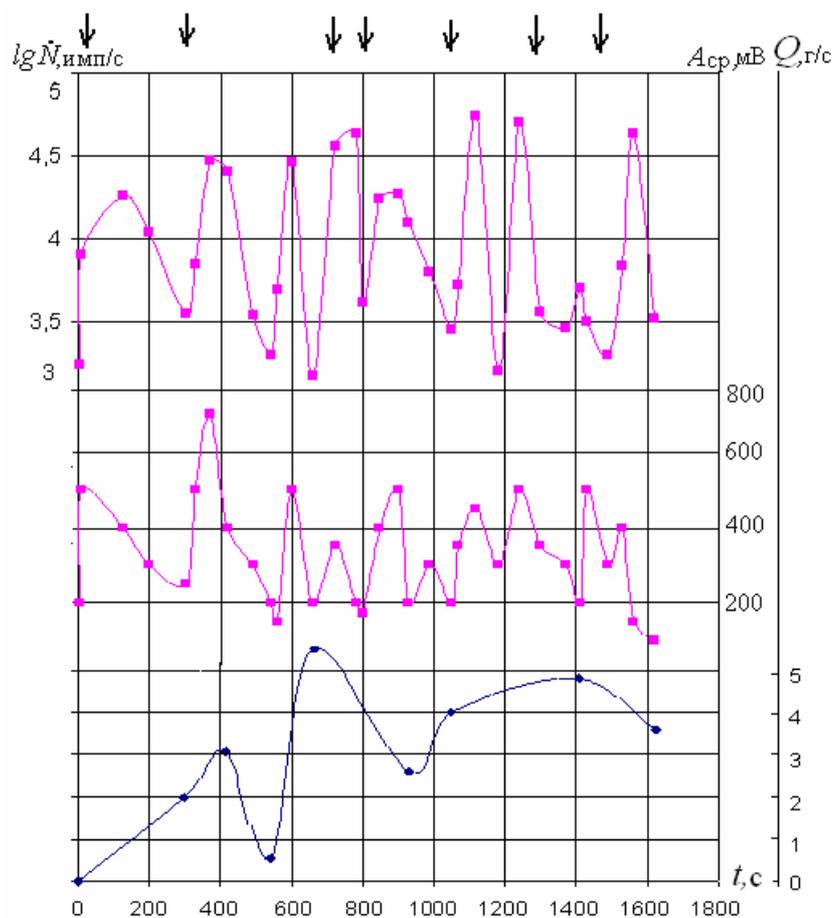


Рисунок 4.11 – Кинетика производительности Q мельницы и параметров $\lg \dot{N}$, A_{cp} акустического излучения зоны помола шамота.

Таким образом, оптимальная производительность мельницы в замкнутом цикле измельчения достигается при дискретной подаче материала, контроль за которой можно осуществлять с помощью акустического мониторинга зоны помола с установлением заданной величины акустических параметров, характеризующих оптимальный режим измельчения. Далее необходимо разработать способы, обеспечивающие своевременную подачу порций материала в количестве, реализующем максимальную эффективность измельчения.

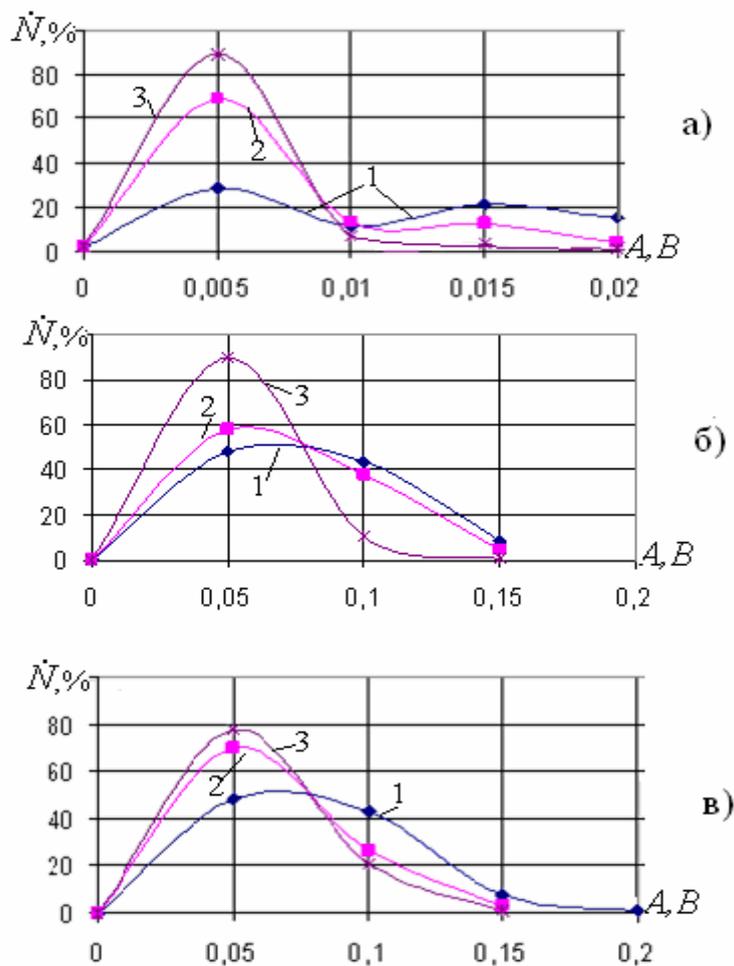


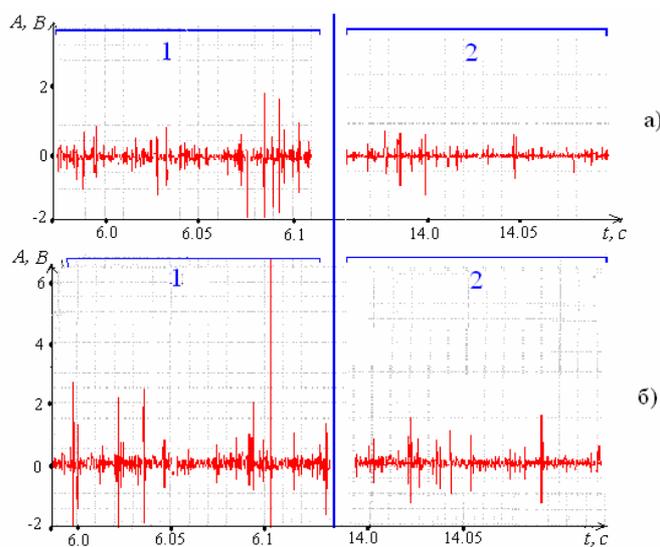
Рисунок 4.12 – Распределение акустической активности \dot{N} зоны помола по величине амплитуд на различных стадиях измельчения циркона в установках лабораторного (УСИ-20, УСИ-0,2) и промышленного (УСИ-1000) типоразмера: а) УСИ-20 – $S_{y\partial} = 2730 \text{ см}^2 / \text{г}$, $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, $P = 0,3 \text{ МПа}$; б) УСИ-02 – $S_{y\partial} = 5856 \text{ см}^2 / \text{г}$, $n = 5000 \text{ мин}^{-1}$, $P = 0,3 \text{ МПа}$; в) УСИ-1000 – $S_{y\partial} = 2375 \text{ см}^2 / \text{г}$, $n = 180 \text{ мин}^{-1}$, $P = 0,6 \text{ МПа}$; 1- загрузка струй, 2- рабочий режим, 3- разгрузка струй.

4.5 Обоснование использования акустоэмиссионных параметров для оценки технологии струйного измельчения

В ходе акустического мониторинга струйной мельницы решалась задача установления связей загрузки струй материалом и производительности мельницы с акустическими параметрами при измельчении твердых сыпучих

материалов. Анализ экспериментальных данных показал, что с началом разгрузки струй наблюдается уменьшение активности АЭ и величины средней и максимальной амплитуды АС. Этот результат объясняется тем, что с течением времени измельчения (без дозагрузки порций материала) уменьшается крупность частиц циркулирующей нагрузки (возврата продукта классификатора в инжекторы), одновременно снижается вероятность соударений частиц из-за уноса части измельченного продукта в циклон. Эти факторы являются причиной наблюдаемого уменьшения производительности мельницы.

Величина акустических параметров процесса струйного измельчения зависит от давления и температуры энергоносителя. На рисунке 4.13 показано влияние давления энергоносителя в различных режимах загрузки струй материалом на изменение амплитуд АС в процессе измельчения шамота и каолино-кварцевого материала. Можно сделать вывод об увеличении средних и максимальных значений амплитуд АС при более высоких начальных давлениях сжатого воздуха в результате увеличения скорости струй и скорости соударений частиц в зоне помола. Этот эффект прослеживается как в рабочем режиме (1), так и на стадии разгрузки струй (2).



а) $P = 0,25$ МПа , б) $P = 0,4$ МПа , $n = 500$ об/мин,

Рисунок 4.13 – Записи акустических сигналов зоны измельчения при различных давлениях энергоносителя

На рис. 4.14 показана кинетика изменения амплитудно-частотных характеристик АС, записанных для холодного (1) и горячего (2) энергоносителя при прочих равных технологических параметрах ($P = 0,25$ МПа и $n = 500$ мин⁻¹).

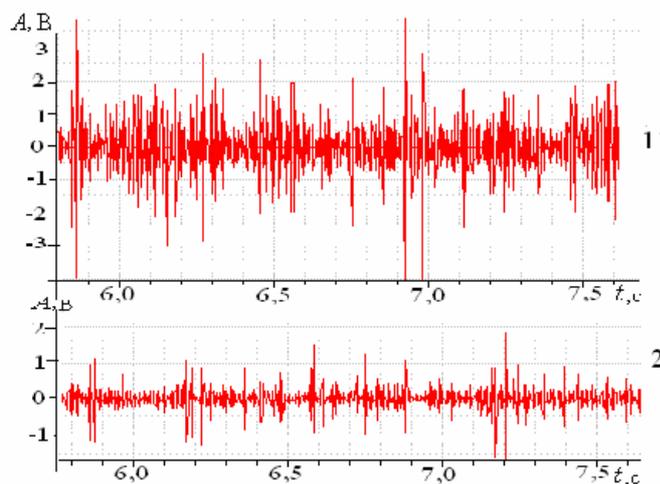


Рисунок 4.14 – Записи сигналов зоны измельчения при разной температуре энергоносителя: 1 – $t=20^{\circ}\text{C}$, 2 - 120°C .

При возрастании температуры энергоносителя на входе в помольную камеру с 298 К до 373 К на рабочем режиме измельчения максимальная амплитуда АС возросла с $A_{max} = 3$ В до $A_{max} = 4,5$ В. Проведенный анализ активности АС показал зависимость этой величины от температуры энергоносителя. При повышении температуры с $t_g = 298\text{K}$ до $t_g = 333\text{K}$ число АС за 1с возросло с $\dot{N} = 40,2 \cdot 10^3$ до $\dot{N} = 41,8 \cdot 10^3$ при $P = 0,25$ МПа и $n = 700$ мин⁻¹.

Таким образом, амплитудно-частотные параметры процесса измельчения зависят от температуры энергоносителя. В свою очередь, эти параметры говорят о процессах, происходящих с измельчаемыми материалами, и несут определенную информацию о свойствах получаемого продукта измельчения.

На рис. 4.15 приведены результаты экспериментов, устанавливающих технологические связи производительности G и показателя дисперсности β с начальным давлением энергоносителя P и частотой вращения n ротора клас-

сификатора. Графики иллюстрируют возможности регулирования показателей G и β измельчения в достаточно широком диапазоне путем изменения параметров P и n .

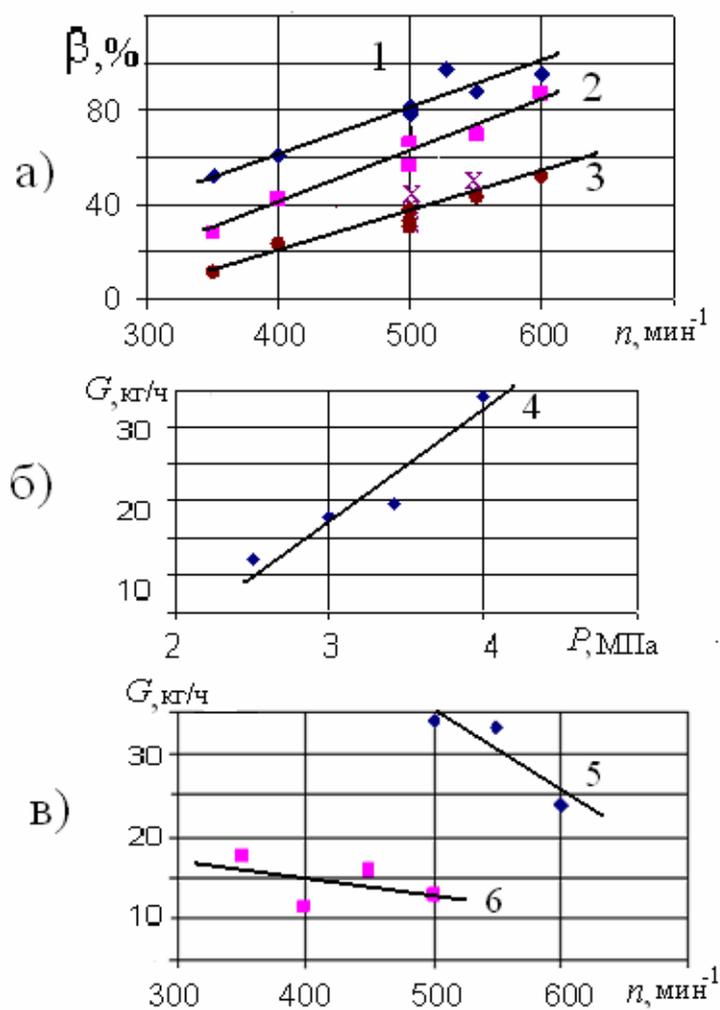


Рисунок 4.15 – Технологические характеристики струйного измельчения шамота: а) - $P = 0,3$ МПа; 1- β_{-100} ; 2- β_{-63} ; 3- \times - β_{-50} , \bullet - β_{-40} ;

б) - 4 – $n = 500-550$ мин⁻¹; в) - 5- $P = 0,4$ МПа, 6 - $P = 0,3$ МПа

С позиций требуемой дисперсности измельченного продукта для измельчения в условиях лабораторной установки УСИ-20 выбирались следующие режимы: $P = 0,25 - 0,5$ МПа, $n = 600 - 3000$ мин⁻¹.

4.6 Исследование связи дисперсности с акустическими характеристикам сигналов зоны помола

В ходе исследований установлены закономерности изменения амплитуд акустических сигналов и их распределений в зависимости от размера загружаемых частиц и дисперсности получаемого продукта. На рис. 4.16 показана зависимость характеристик АС от размера частиц измельчаемого материала.

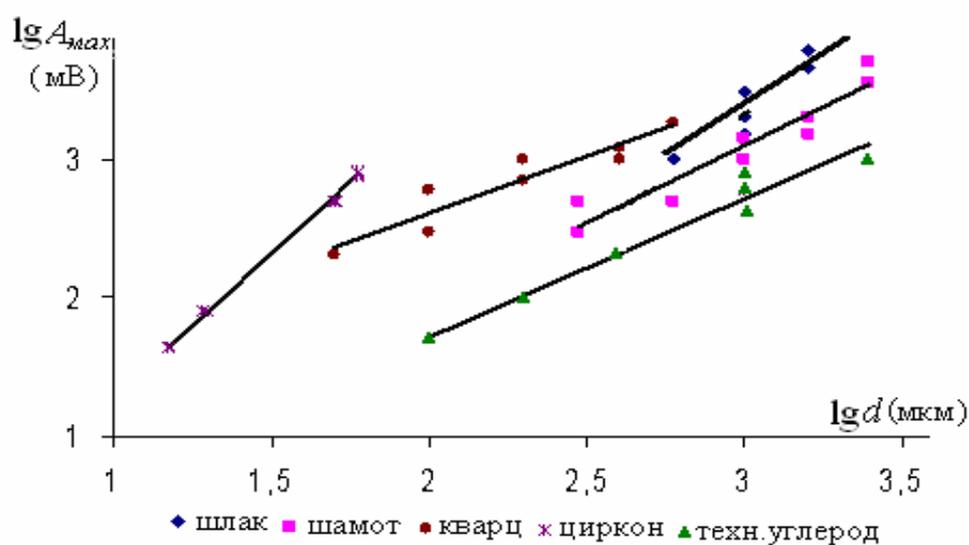


Рисунок 4.16 – Логарифмические зависимости максимальной амплитуды от размера измельчаемых частиц.

Максимальные значения амплитуд АС в начале рабочего режима измельчения (первые секунды) коррелируют с размером измельчаемых частиц (см. рис. 4.16), тогда как по завершении стадии разгрузки струй величина амплитуды АС коррелирует с параметром дисперсности $S_{y\delta}$ (удельной поверхностью) измельченного продукта (см. рис.4.17). Анализ подвергались участки спектров амплитуд на стадии разгрузки струй. На этой стадии величина A_{max} может служить оценкой размеров частиц циркулирующей нагрузки.

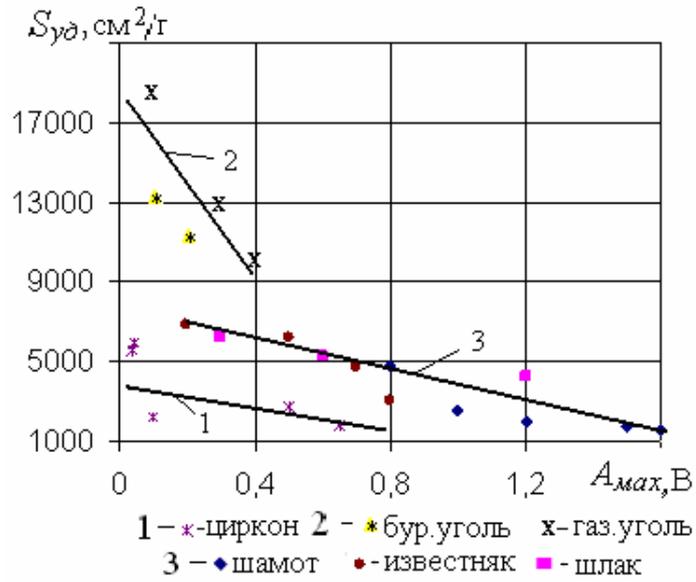


Рисунок 4.17 – Зависимость амплитуды сигналов зоны измельчения на стадии разгрузки от дисперсности измельченного продукта

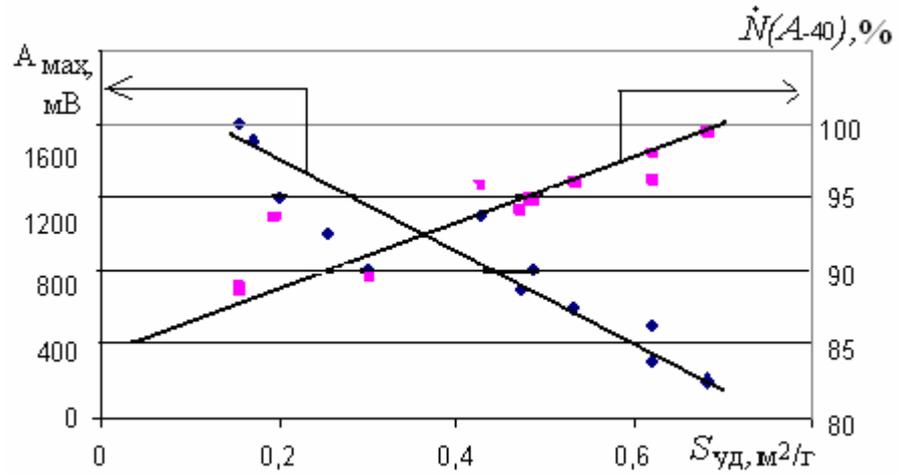


Рисунок 4.18 – Зависимости величины максимальной амплитуды и долевого участия малоамплитудных сигналов от удельной поверхности измельченных материалов плотностью 2,8–3,0 г/см³

Результаты исследований показывают, что процесс накопления в спектрах акустических сигналов с малыми значениями амплитуд (порядка 5–20 мВ) характеризует преимущественное содержание в струе частиц малых размеров, т.е. на преобладающие в кинетике измельчения эффекты диспергирования материала. По опытным данным работы струйной установки УСИ-20 установлены связи акустических параметров с удельной поверхностью $S_{y\partial}$ измельченных продуктов. На рис. 4.18 показаны зависимости максимальной амплитуды A_{max} и относительной доли $N(A_{40})$ сигналов с амплитудой менее 40 мВ от $S_{y\partial}$. Видно, что повышение дисперсности измельчаемого порошка сопровождается уменьшением характерной (максимальной) величины амплитуды A_{max} и ростом долевого участия малоамплитудных сигналов.

При плотности 2,8–3,0 г/см³ связи акустических параметров A_{max} , мВ, $N(A_{40})$, % с показателем дисперсности $S_{y\partial}$ (м²/г) можно описать уравнениями: $N(A_{40}) = 16 \cdot S_{y\partial} + 87$, $A_{40} = 1749 - 2172 \cdot S_{y\partial}$, с достоверностью аппроксимации, соответственно: $R^2 = 0,75$ и $R^2 = 0,86$.

Результаты акустического мониторинга струйной мельницы убеждают в возможности использования акустической информации о зоне помола для оптимизации процесса тонкого измельчения.

Исследования позволили установить логарифмическую зависимость величины максимальной амплитуды от размера частиц измельченного продукта для различных материалов (см. рис. 4.16).

Так, зависимость для разных материалов выражена формулами: для шамота – $\log A = 1,1 \log d - 0,21$, для шлака – $\log A = 1,55 \log d - 1,3$, для кварца – $\log A = 0,8 \log d + 0,99$, для циркона – $\log A = 2,1 \log d + 0,76$, для технического углерода – $\log A = 0,99 \log d - 0,26$. На основании построенных графиков установлена трехпараметрическая зависимость величины максимальной амплитуды от размера частиц измельченного продукта и плотности материала в виде: $A_{max} = d \cdot 10^{0,4\rho+0,3}$.

Из уравнений видно, что наибольшее влияние оказывает плотность материала. Между величиной максимальной амплитуды и размером частиц продукта существует прямо пропорциональная зависимость, тогда как между амплитудой и плотностью – экспоненциальная зависимость с основанием десять. Таким образом, зная две величины – характерные размеры частиц классов измельченного продукта и плотность ρ материала, можно определить A_{\max} этих классов частиц при измельчении по установленной зависимости (рис. 4.19) с коэффициентом корреляции $r = 0,88$

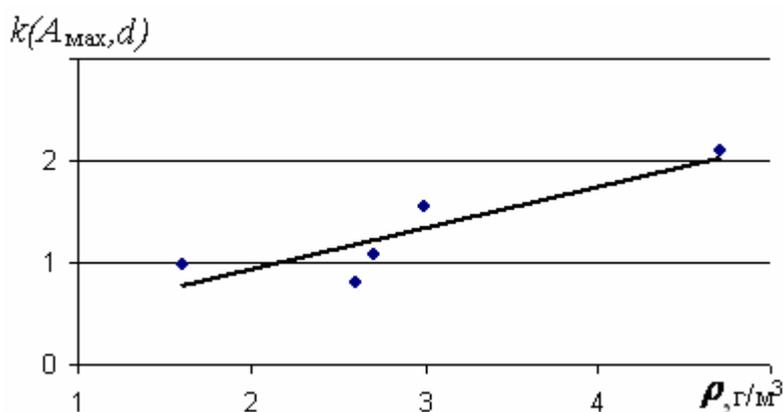


Рисунок 4.19 – Зависимость максимальной амплитуды от плотности и размера частиц материала

Установленные закономерные связи технологических и акустических параметров струйного измельчения материалов подтверждено в условиях промышленного струйного измельчения циркона.

На рис. 4.20 а) сопоставлены амплитудные распределения АС зоны помола промышленной струйной мельницы УСИ–2000 с гранулометрическими распределениями частиц исходного материала и измельченного продукта в различных режимах измельчения цирконового концентрата. На рис. 4.20 б) иллюстрируется влияние частоты n вращения ротора классификатора типа КОВ на активность и амплитуду АС: $\dot{N} = f(\lg A)$. Анализ графиков позволяет сделать вывод об уменьшении преимущественных значений амплитуд (графики 4.20 б) с повышением частоты n вращения ротора классификатора.

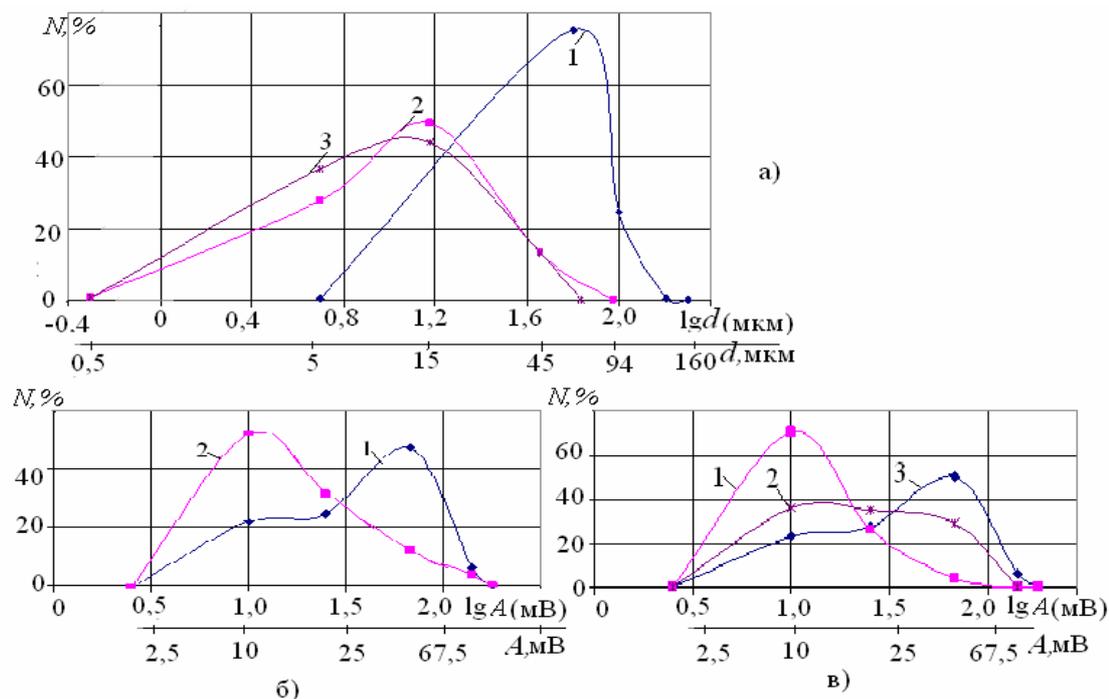


Рисунок 4.20 – Гранулометрическое распределение $N = f(\lg d)$ частиц (а) и амплитудные распределения АС зоны помола $N = f(\lg A)$ (б, в) в различных режимах струйного измельчения цирконового концентрата в УСИ-1000: а) 1- исходный материал, 2 - измельченный продукт, $n = 84 \text{ мин}^{-1}$, 3 - измельченный продукт, $n = 180 \text{ мин}^{-1}$; б) 1- $n = 84 \text{ мин}^{-1}$, 2 - $n = 180 \text{ мин}^{-1}$; в) 1- $P = 0,3 \text{ МПа}$, 2- $P = 0,4 \text{ МПа}$, $P = 0,6 \text{ МПа}$, $n = 84 \text{ мин}^{-1}$.

Увеличение давления энергоносителя (сжатого воздуха) сопровождается ростом максимальных значений $A_{\text{макс}}$ амплитуд АС (графики 4.20 в). Как видно из графиков, увеличение скорости истечения струи из сопла при больших значениях P обуславливает рост счета N АС с максимальными значениями амплитуд, что объясняется увеличением скорости частиц при соударениях с волноводом

4.7 Определение гранулометрического состава материала на основе акустической информации

Проведенные исследования связей акустических и технологических параметров струйного измельчения дало возможность разработать способ определения гранулометрического состава сыпучего материала на основе акустических сигналов, записываемых волноводом в потоке этого материала.

Для исследования связей амплитудных распределений с гранулометрическим составом сыпучего материала была создана специальная установка для транспортирования частиц энергоносителем (сжатым воздухом) и одновременного акустического анализа.

Схема акустического гранулометра, включающего эжекторный узел струйной мельницы, показана на рис. 4.21.



Рисунок 4.21 – Схема акустических измерений размера частиц в потоке при пневмотранспортировании.

Установка работает следующим образом. Энергоноситель под давлением $P = 0,3$ МПа подается в разгонную трубку. Сыпучий материал подается самотеком из бункера, подхватывается энергоносителем и транспортируется над волноводом. Частицы соударяются с волноводом, связанным с датчиком. Акустическая информация далее передается через АЦП в компьютер для

анализа и обработки. При этом для каждого материала заданной крупности заранее записываются и сохраняются акустические сигналы, регистрируемые при прохождении узких фракций через устройство. Сигналы, фиксируемые при прохождении смесей фракций в исходном анализируемом материале, сравниваются с сигналами отдельных узких фракций. В результате путем корреляционного анализа прогнозируется гранулометрический состав транспортируемого материала.

Установлено, что амплитуда акустических сигналов зависит от размера частиц, содержащихся в потоке. На рис. 4.22 показаны записи сигналов, фиксируемые системой акустического мониторинга при подаче в воздушном потоке узких фракций кварцевого песка при давлении энергоносителя (воздуха) $P = 0,3$ МПа. Аналогично транспортировали смеси двух кварцевых песков различного гранулометрического состава. Записи сигналов транспортировки смесей показаны на рис. 4.23.

Изучение возможностей прогнозной оценки гранулометрии измельченных частиц по акустическим параметрам их транспортирования и соударений проводится для осуществления контроля и управления гранулометрическим составом частиц путем реализации акустического мониторинга процесса струйного измельчения.

Анализировалось распределение амплитуд сигналов, вызываемых транспортировкой фракций и смесей кварцевых песков, и проводилось сопоставление с распределением гранулометрического состава этих смесей (см. рис. 4.22 – 4.23).

Для получения информации о размерах частиц готового продукта мельницы использовали параметры акустического излучения зоны помола струйной установки. К числу параметров, влияющих на измельчаемость и показатели акустической активности рабочего процесса, отнесены: длительность τ процесса, давление P и температура T сжатого воздуха, частота n вращения ротора классификатора, степень загрузки струй материалом, амплитуда АС (средняя и максимальная), счет АС за единицу времени \dot{N} .

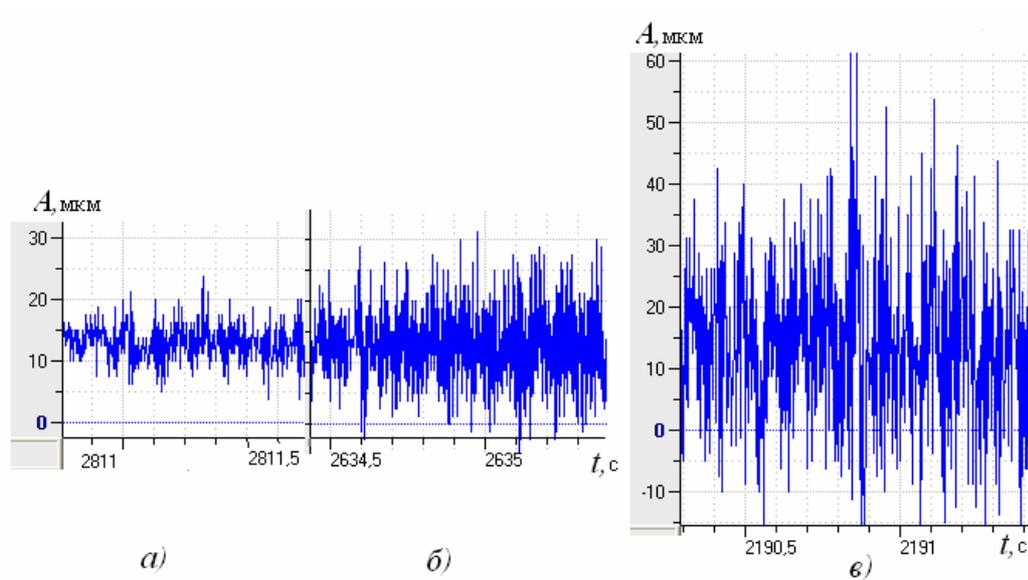


Рисунок 4.22 – Записи сигналов при подаче различных фракций кварцевого песка: а – 100мкм, б – 200 мкм, в – 400 мкм

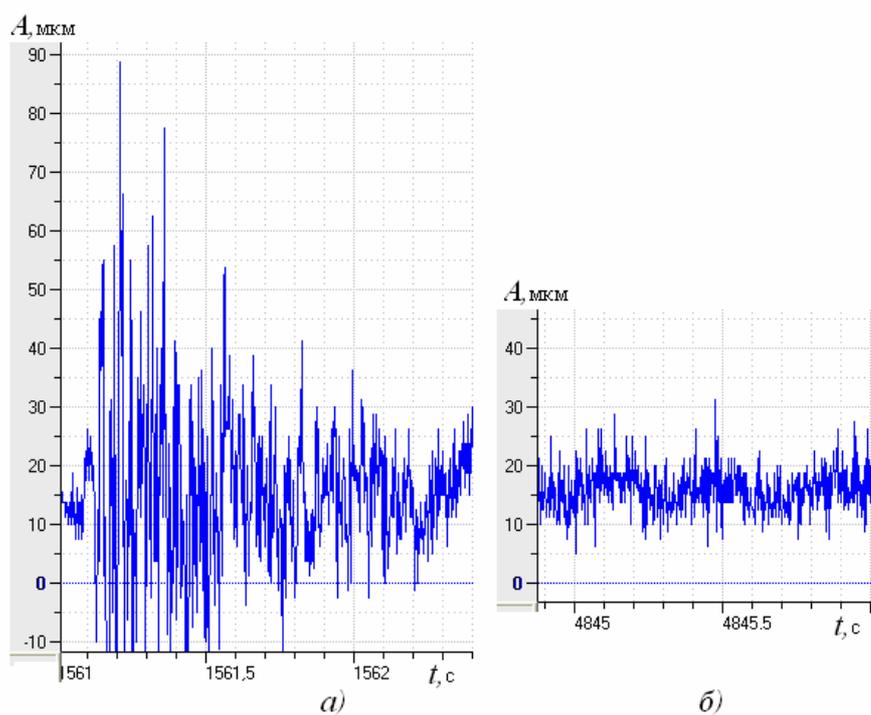


Рисунок 4.23 – Записи сигналов процесса подачи смесей кварцевого песка

На рисунке 4.24 показан гранулометрический состав исследуемого материала в виде смеси и узких фракций, на рис. 4.25 иллюстрируются записи акустических сигналов в моменты их транспортирования.

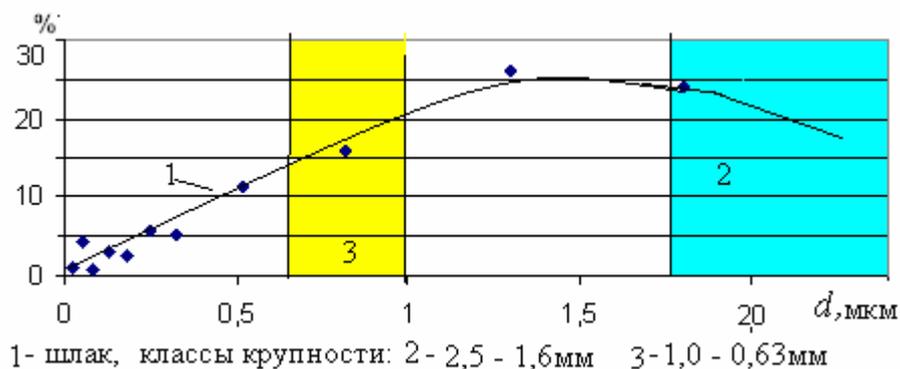


Рисунок 4.24 – Гранулометрический состав исследуемого шлака.

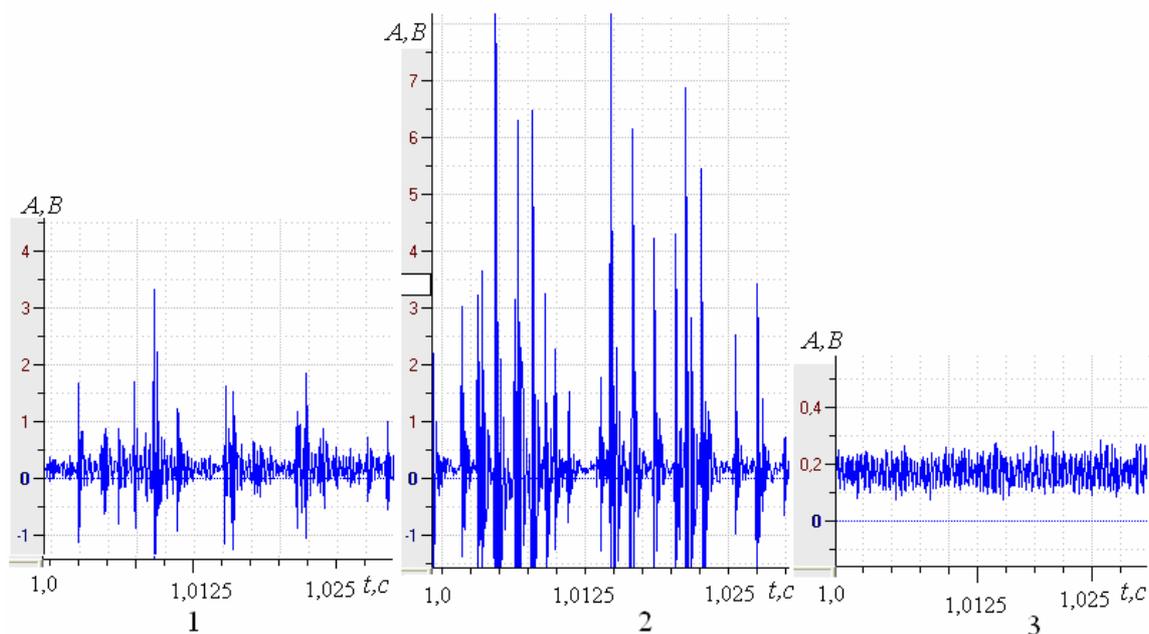


Рисунок 4.25 – Акустограммы сигналов при транспортировании частиц шлака крупностью 1) 2,5 – 0,01мм 2) – 2,0-1,6мм; 3) – 0,4 – 0,3мм

В таблице 4.3 приведены результаты амплитудного анализа размеров частиц в процессе пневмотранспортирования доменного шлака в установке, схема которой показана на рисунке 4.21. Сопоставление табличных значений

амплитуд и диапазонов их изменения с аналогичными величинами для размеров частиц подтверждает закономерность прямо пропорциональной корреляционной связи этих параметров.

Таблица 4.3

Результаты амплитудного анализа размеров частиц при пневмотранспортировании шлака

Класс крупности, мм											
d_{cp} , мм	1,8	1,3	0,82	0,52	0,325	0,25	0,18	0,13	0,083	0,052	0,025
$d_i - d_j$	2,0-1,6	1,6-1,0	1,0-0,63	0,63-0,4	0,4-0,315	0,315-0,2	0,2-0,16	0,16-0,1	0,1-0,063	0,063-0,05	<0,05
γ , %	23,9	26,02	15,96	11,24	5,22	5,85	2,54	3,06	0,87	4,28	1,06
Диапазон амплитуд, мВ											
A_{cp} , мВ	3,5	2,5	1,5	0,75	0,4	0,175	0,07	0,027	0,0125	0,00085	0,0065
$A_i - A_j$	4,0-3,0	3,0-2,0	2,0-1,0	1,0-0,5	0,5-0,3	0,2-0,15	0,09-0,05	0,035-0,02	0,015-0,01	0,01-0,007	0,008-0,005

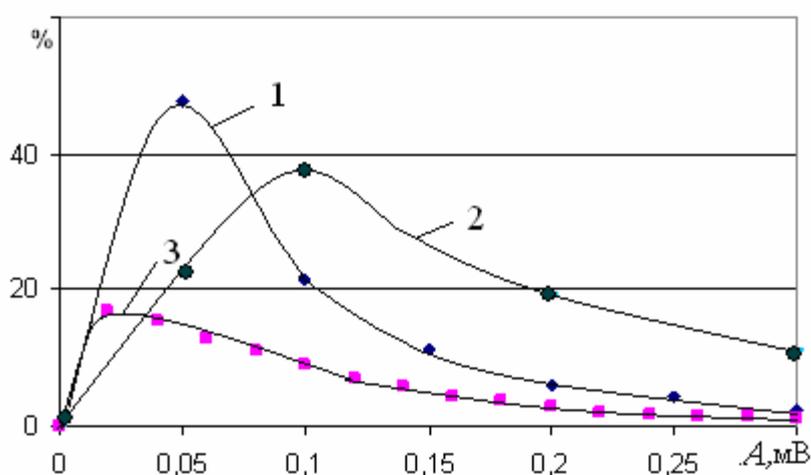


Рисунок 4.26 – Амплитудные распределения при транспортировании частиц шлака различной крупности: 1) исходный неклассифицированный материал, 2,5 – 0,0 мм; 2) класс крупности 2,5 – 2,0 мм; 3) класс крупности 1,0 – 0,63 мм.

Результаты измерений максимальной амплитуды АС для различных классов крупности частиц при струйном измельчении

Материал, Плотность	$d_{\text{экспер}}$, мм	$A_{\text{мах}}$, В	$d_{\text{расч}}$ мм	Уравнение, R корреляции с эксперим
Лабораторные эксперименты				
Шлак	1,6	6	1,70	$\lg d = 0,5 \lg A + 1,3;$ $R = 0,97$
	1,0	3	1,19	
	0,8	2,0	0,97	
	0,63	1,0	0,68	
	0,45	0,5	0,48	
	0,3	0,3	0,37	
	0,2	0,2	0,30	
Кварц	0,5	1,8	0,54	$\lg d = 1,09 \lg A + 0,81,$ $R = 0,95$
	0,3	1,2	0,35	
	0,2	1,0	0,29	
	0,1	0,6	0,164	
	0,08	0,3	0,772	
	0,05-0,04	0,2	0,496	
Циркон	0,063-0,05	0,8	0,061	$\lg d = 0,49 \lg A + 0,37,$ $R = 0,99$
	0,05-0,04	0,5	0,049	
	0,04-0,02	0,045	0,015	
Промышленные эксперименты				
циркон	0,16	0,4	0,163	$\lg d = 0,52 \lg A + 0,86,$ $R = 0,98$
	0,063	0,06	0,61	
	0,045	0,02	0,34	
	0,02	0,01	0,24	

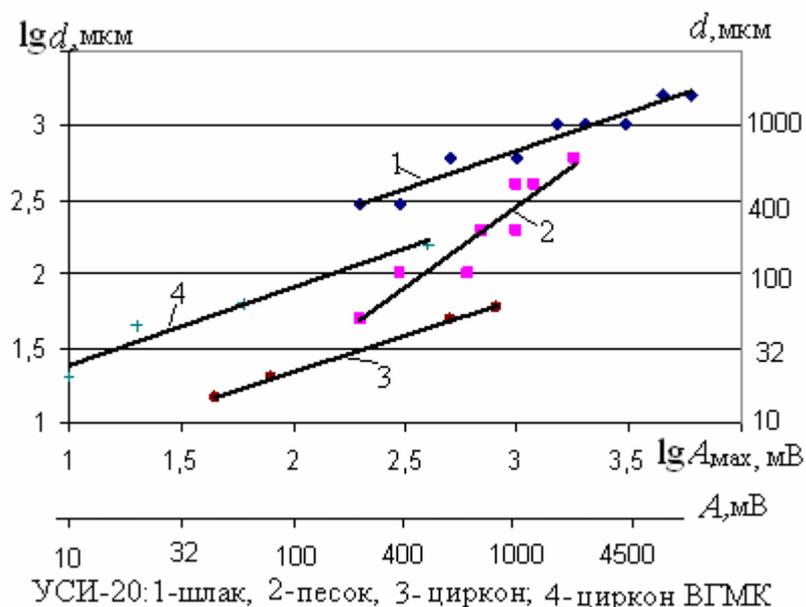


Рисунок 4.28 – Результаты измерений максимальной амплитуды АС для различных классов крупности частиц при лабораторно и промышленном струйном измельчении

Исследования связи гранулометрического состава измельчаемого материала и максимальной амплитуды акустических сигналов зоны измельчения или пневмотранспортирования частиц материала позволило разработать методику прогнозирования грансостава продуктов струйного измельчения на основе результатов акустического мониторинга процесса. Блок-схема алгоритма приведена на рис. 4.29. На первом этапе предварительного исследования материала на измельчаемость осуществляется акустический мониторинг процесса измельчения или пневмотранспортировки материала. Определяются основные технологические и акустические параметры процесса и конкретный вид зависимости $\lg d = f(\lg A)$ для выбранного материала и режима обработки. Наполняется база данных (БД). Осуществляется контрольное измельчение или транспортировка с непрерывным акустическим мониторингом процесса. По результатам акустического мониторинга вычисляются значения A_{max} и данным БД вычисляется среднее значение $d_{изм}$.



Рисунок 4.29 – Блок-схема методики прогнозирования грансостава материала в ходе измельчения или пневмотранспортирования

Установлена возможность прогнозирования среднего размера частиц по уравнениям корреляционной связи этого параметра с величиной максимальной амплитуды акустических сигналов при транспортировании или путем соударений частиц при струйном измельчении. При этом переход максимума амплитудных распределений акустических сигналов в диапазон меньших значений амплитуд характеризует накопление в струе частиц малых размеров. Основой прогнозирования крупности частиц при транспортировании или струйном измельчении является предварительно установленные уравнения корреляционной связи максимальных значений амплитуд наблюдаемых акустических сигналов с размером частиц исследуемого материала.

4.8 Анализ акустического излучения различных зон мельницы.

Однако помимо повышения производительности, важным показателем эффективной работы газоструйного измельчителя является качество получаемого продукта. Качество измельченного материала можно оценивать по гранулометрическому составу, по выходу определенного класса крупности. На промышленных предприятиях обычно проводят контроль по выходу класса -45 мкм или -63 мкм. При тонком и сверхтонком измельчении проводят контроль дисперсности по удельной поверхности получаемого продукта. Для многих производственных процессов требуется материал однородного дисперсного состава, малейшее отклонение от заданного размера частиц ведет к нарушению технологического процесса и ухудшению качества получаемой продукции. Поэтому актуальной проблемой является контроль качества получаемого продукта газоструйного измельчения.

В ходе исследований были определены методы контроля необходимого качества получаемого продукта при поддержании оптимального режима газоструйного измельчения.

На рис. 4.30 показано различие амплитуд АС в зоне измельчения (б) и в потоке готового измельченного продукта (а), поступающего из классификатора. Это обусловлено разными происходящими процессами, различными скоростями потоков и разным дисперсным составом частиц в зонах регистрации АС.

Качество измельченного продукта анализировалось по полученному продукту несколькими параметрами. Оценка дисперсности измельченного продукта осуществлялась по его гранулометрическому составу, который определялся в результате ситового анализа по содержанию фракций менее 100, 63, 50, 40 мкм, $(\beta_{-100} - \beta_{-40})$, и по удельной поверхности $S_{уд}$, измеряемой на приборе Товарова ТЗ и MALVERN.

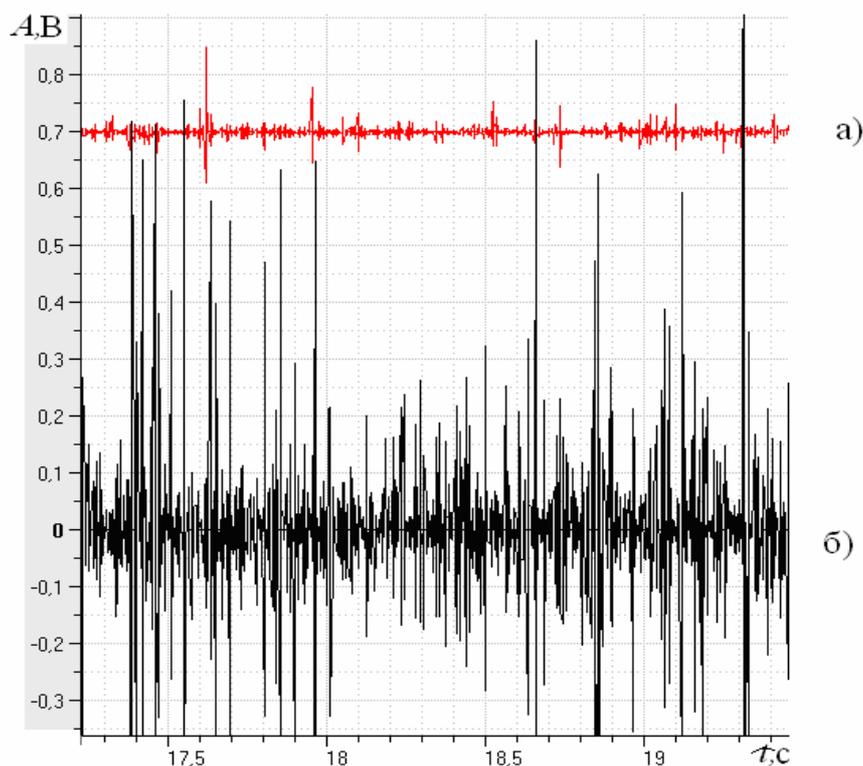


Рисунок 4.30 – Записи акустических сигналов в зоне за классификатором (а) и в зоне измельчения (б) шамота: а) – амплитуды АС на выходе из классификатора ($A = 0,01 - 0,05$ В); б) – амплитуды АС в зоне измельчения ($A = 0,2 - 0,8$ В)

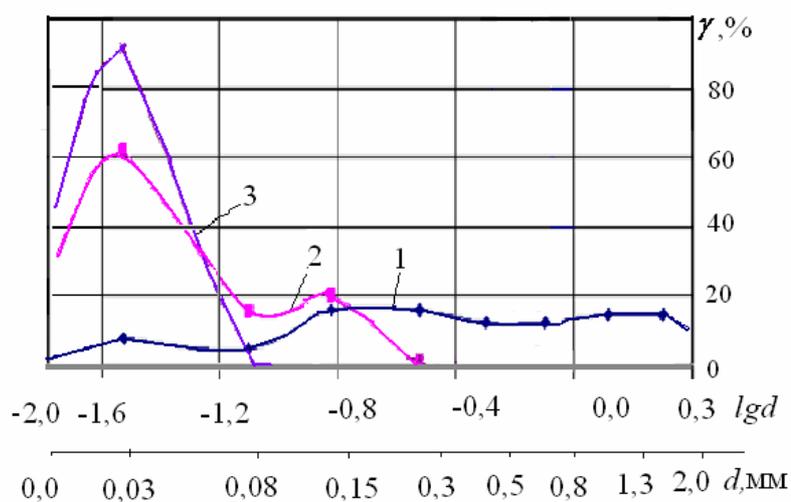


Рисунок 4.31 – Гранулометрический состав исходного (1) материала и измельченного материала в шаровой (2) и струйной (3) мельнице

Эти результаты сопоставлялись с параметрами акустических сигналов зоны за классификатором и в зоне измельчения. На рис. 4.31 представлены в полулогарифмических координатах результаты измерения гранулометрического состава исходного дробленого материала (1) и продуктов измельчения шаровой (2), газоструйной (3) мельниц.

Продукт, измельченный в струйной противоточной мельнице, имеет значительно больше мелких фракций (менее 0,05мм), и гранулометрический состав носит более монодисперсный характер.

Дисперсность получаемого материала зависит от частоты вращения классификатора, с увеличением числа оборотов n ротора классификатора увеличивается доля мелких фракций, т.е. изменяется дисперсность материала. Как показали испытания [83], дисперсность продукта циклона струйной установки, характеризуемая содержанием в материале фракций от - 40 до - 100 мкм, увеличивается практически линейно с ростом числа оборотов ротора классификатора в диапазоне $n = 350 - 2000 \text{ мин}^{-1}$.

Зависимость дисперсности от частоты вращения ротора классификатора подтверждается на примере измельчения различных гетерогенных материалов. На рис. 4.30 показано влияние режима классификации на величину $S_{уд}$ удельной поверхности измельченных материалов.

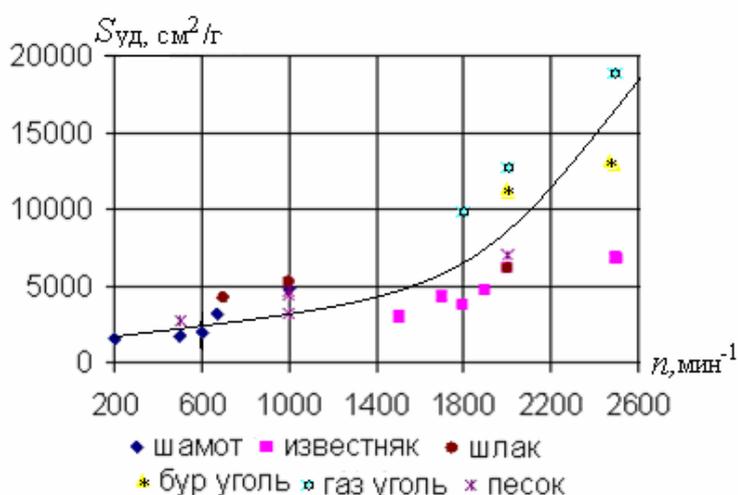


Рисунок 4.32 – Зависимость дисперсности измельченного материала от режима классификации

На примере измельчения шамота, известняка, шлака, песка, угля видно, что в диапазоне $n = 200 - 2600 \text{ мин}^{-1}$ S_{yd} порошков возрастает на порядок: от 2000 до 19000 $\text{см}^2/\text{г}$.

Выводы

1. Установлено, что процесс струйного измельчения характеризуется следующими зависимостями: производительности мельницы $G = f(P, n)$ и дисперсности измельченного продукта $\beta = f(n)$ от давления P энергоносителя и частоты n вращения ротора классификатора. По этим зависимостям на основе мониторинга основных акустоэмиссионных параметров процесса измельчения в помольной камере определяются оптимальные параметры измельчения.

2. На основе использования двух датчиков в различных зонах струйной установки реализован контроль качества измельчения при соблюдении оптимального режима измельчения. Управление дисперсностью продукта струйной мельницы при соблюдении оптимального режима измельчения возможно на основе зависимости $\beta = f(n)$, а наблюдение размеров d измельчаемых частиц – на основе акустического мониторинга амплитуд АС в режиме разгрузки струй с учетом зависимости $d = f(A)$.

3. Выявлены следующие закономерности акустического излучения струйной установки:

- - изменение крупности измельчаемого материала, размеров частиц, удельной поверхности полученного продукта и стадий измельчения сопровождается изменением параметров акустических сигналов (распределением амплитуд и уровнем активности), измеренных в ходе мониторинга рабочей зоны измельчительной установки;
- - величина амплитуды АС в характерных состояниях струй (разгрузка и завал) при измельчении имеет значительные различия - до несколько порядков, что позволяет считать перспективным применение акустиче-

ского мониторинга для регулирования процесса газоструйного измельчения; избыточная загрузка струй материалом сопровождается уменьшением амплитуды акустического излучения, что указывает на снижение динамичности измельчения.

- размер частиц измельченного материала определяется амплитудой по экспериментально установленным логарифмическим соотношениям

4. Преимущественные и максимальные амплитуды сигналов находятся в функциональной зависимости от давления энергоносителя и частоты вращения ротора классификатора, что составляет основу управления дисперсностью измельченного продукта.

5. Результаты исследований позволяют считать, что накопление в спектрах АС с малыми значениями амплитуд (порядка 5-20 мВ) указывает на преимущественное накопление в струе частиц малых размеров, т.е. на преобладающие в кинетике измельчения эффекты диспергирования материала.

6. Базовым подходом к повышению производительности и снижению энергоемкости тонкого измельчения является использование связи эффектов измельчения и диспергирования (производительности, размера частиц, удельной поверхности продукта) с акустическими характеристиками зоны помола и классификации для идентификации технологического процесса.

7. Закономерность уменьшения активности и максимальных амплитуд акустических сигналов в зоне помола является признаком отклонения от оптимальности режима тонкого измельчения, что характеризует снижение производительности мельницы и требует своевременной подачи материала.

8. Закономерное увеличение доли малоамплитудных акустических сигналов в наблюдаемом спектре сигналов в зоне помола и классификации указывает на повышения дисперсности готового продукта и вызывает необходимость уточнения режима классификации.

5 ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ АКУСТИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИИ

Установленные закономерности и полученные экспериментальные данные позволили разработать информационную систему измельчения (ИСИ) на основе мониторинга акустических параметров. Основу системы образуют разработанные базы данных, в которых хранится информация о результатах измельчения на экспериментальных установках.

5.1 Создание базы данных технологии и мониторинга измельчения

Особенность создания базы данных акустических сигналов мониторинга процесса измельчения заключается в выделении классов записанных сигналов по материалам, технологическим режимам и режимам загрузки струй материалом. Это классификация необходима для создания базы эталонов сигналов соответствующих кластеров. Определив границы этих классов, можно добиться достаточно точной работы системы распознавания принадлежности полученного сигнала к какому-либо классу эталонов, что ведет к определению соответствующего режима измельчения и дальнейшего управления процессом.

Таким образом, база данных разделена на три группы:

1. закодированные названия всех материалов, подвергающихся измельчению, с указанием источника и региона получения или добычи его;
2. технологические параметры процесса измельчения, включающие давление и температуру энергоносителя, показатели режима классификации (число оборотов ротора классификатора), производительность, исходную крупность материала, дисперсность полученного продукта и т.д.;
3. записи акустических сигналов, зафиксированных датчиками в зоне помола и области за классификатором.

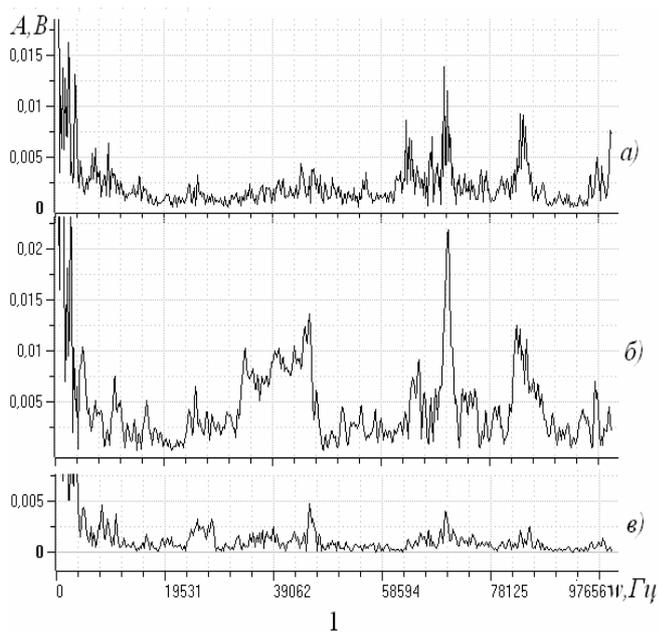
Для наполнения баз данных использовалась следующая методика регистрации и анализа данных.

С помощью системы акустического мониторинга (см. рис. 2.4) сигналы регистрировались АЦП и записывались с частотой 200 - 400кГц за определенный интервал времени (1-2 мин) в течение всего процесса измельчения.

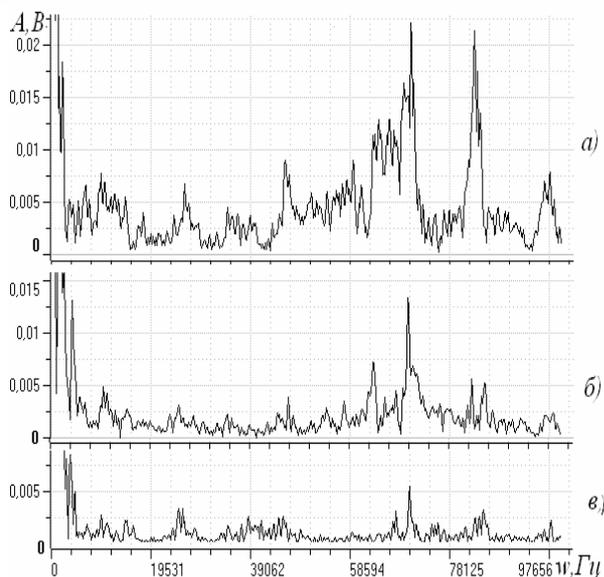
Для дальнейшего анализа выбирались записи сигналов соответствующего технологического режима. Сигналы, рассмотренные за определенный интервал (0,01сек), раскладывались в ряд Фурье, полученные данные передавались в другие алгоритмические компоненты. На рис. 5.1 представлены амплитудно-частотные характеристики эталонов сигналов измельчения шлама и песка для трех характерных классов режимов загрузки струй материалом: а – начальная загрузка, б – рабочий режим, в – разгрузка ($\approx 10\%$ загрузки струй материалом).

После обработки сигналов программой Power Graph на основе метода Фурье множество Ω состоит из набора векторов входных параметров $x_i = \{ x_{i,j} | j = 1, 2, \dots, n \}$ - частот, где $n = 514$ – количество входных параметров. Каждый вектор x_i отвечает определенному классу или группе классов из множества θ . Каждому x_i поставим в соответствие $y_i = \{ y_{i,l} | l = 1, 2, \dots, k \}$, где $k = 2$ – количество классов (в нашем случае 2 класса: 1 - пустая мельница; 2 – полная).

Для создания информационной системы измельчения (ИСИ) использовался комплексный подход, включающий несколько этапов: формирование баз данных и баз знаний, планирование и подготовка акустического мониторинга, интеллектуальный анализ результатов, выбор стратегии измельчения. Общая схема этих этапов показана на рис. 5.2



1



2

Рисунок 5.1 – Амплитудно-частотные характеристики акустических сигналов процесса измельчения шлака (1) и песка (2).

Для анализа результатов акустического мониторинга используются несколько информационных технологий, исследующих записанные акустические сигналы: нейросетевой подход, Вейвлет-анализ сигналов акустического мониторинга, энергетический анализ сигналов, установление характерных информативных частот и анализ сигналов с этими частотам, графические методы идентификации режимов струйного измельчения. Эти методы базировались на разработанной информационной системе процесса струйного из-

мельчения, схема которой показана на рис. 5.2.

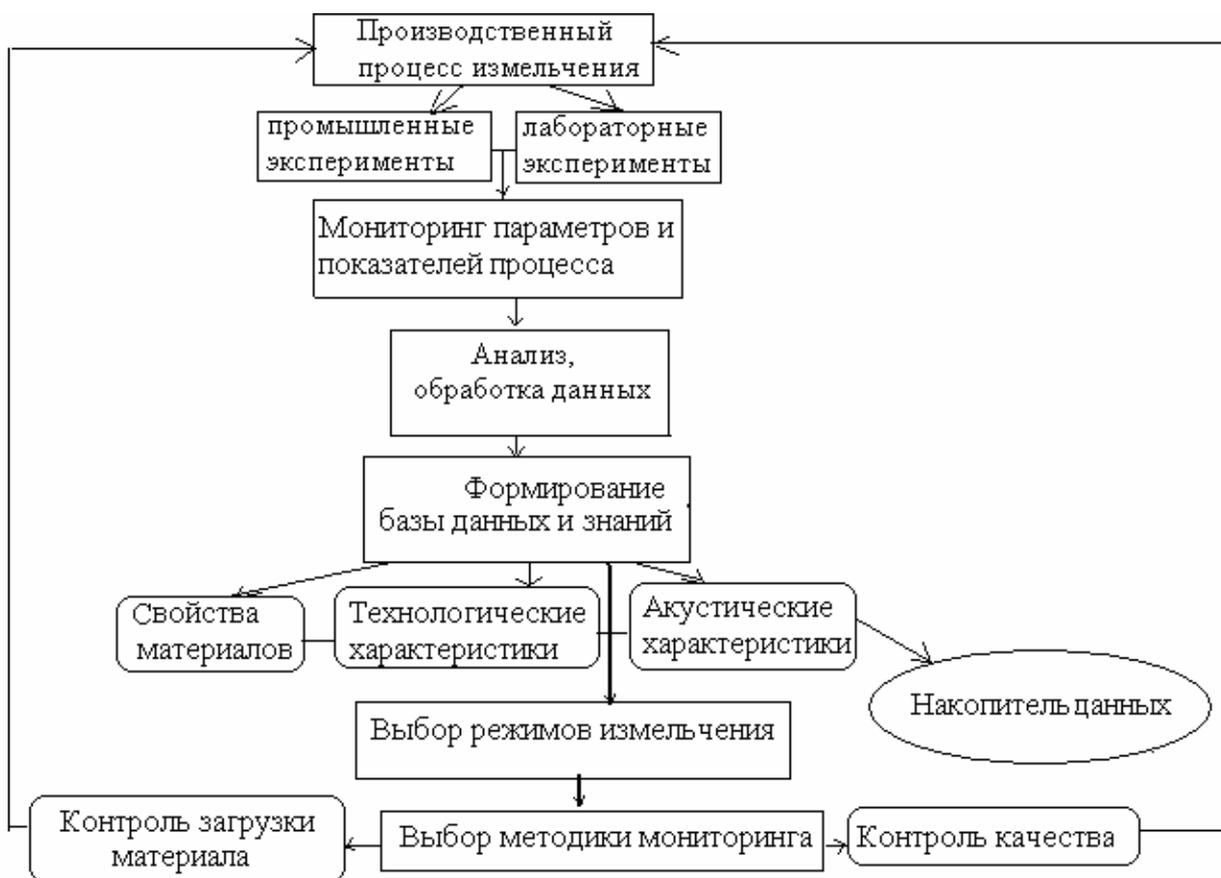


Рисунок 5.2 – Информационная система процесса струйного измельчения на основе акустического мониторинга.

5.2 Разработка логистической модели процесса

Создание логистической модели процесса струйного измельчения включает создание базы данных технологических и акустических параметров процесса; преобразование данных по методу Фурье; нормирование данных для использования в нейронных сетях; обучение нейронных сетей; выделение информативных секторов разбиения; проверка модели на адекватность, графическое представление данных

Разработанная база данных, как результат мониторинга струйного измельчения сыпучих материалов, использовалась для моделирования процесса. Ниже представлены нейросетевой подход к моделированию и оптимиза-

ции струйного измельчения.

Нейросетевой анализ ИСИ позволяет строить нейронные сети вида: многослойный перцептрон, логистическая регрессия, вероятностная нейронная сеть, каскадная корреляция и сеть теории адаптивного резонанса. [87].

Рассмотрим построение нейронных сетей на основе логистической регрессии. Логистическая регрессия, разновидность множественной регрессии, используется для анализа связи между несколькими независимыми переменными (называемыми также регрессорами или предикторами) и зависимой переменной. С помощью логистической регрессии можно оценивать вероятность того, что событие наступит для конкретного рассматриваемого процесса. Бинарная логистическая регрессия применяется в случае, когда зависимая переменная является бинарной (т.е. может принимать только два значения).

Анализируя данные акустического мониторинга процесса струйного измельчения, независимыми переменными x_i считаем выбранные акустические параметры записанных сигналов (амплитуда, частота). Как показали исследования, оптимальный режим измельчения зависит от наполненности струй энергоносителя материалом, т.е., в конечном счете, от заполненности мельницы материалом. Поэтому при создании информационной технологии рассматривается два крайних случая: пустая и полная (загруженная) мельница. Этот смысл вкладывается в значения зависимой переменной: $y=0$ – мельница пустая, $y=1$ – мельница полная.

Как известно, все регрессионные модели могут быть записаны в виде формулы: $y = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Для множественной линейной регрессии предполагается, что зависимая переменная является линейной функцией независимых переменных, т.е. $y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n$.

Эту формула после вычисления коэффициентов регрессии может использоваться для задачи оценки вероятности исхода события. Однако переменная отклика y в таком случае не является бинарной переменной. Поэтому, считая y непрерывной на отрезке $[0,1]$ при любых значениях независимых переменных, используем регрессионное уравнение (логит-преобразование):

$$P = \frac{1}{1 + e^{-y}}, \quad (5.1)$$

где P – вероятность того, что произойдет интересующее событие.

Существует несколько способов нахождения коэффициентов логистической регрессии. На практике часто используют метод максимального правдоподобия. Основу метода составляет функция правдоподобия (likelihood function), выражающая плотность вероятности (вероятность) совместного появления результатов выборки

$$Y_1, Y_2, \dots, Y_k: L(Y_1, Y_2, \dots, Y_k; \theta) = p(Y_1; \theta) \cdot p(Y_2; \theta) \cdot \dots \cdot p(Y_k; \theta) \quad (5.2)$$

Согласно методу максимального правдоподобия в качестве оценки неизвестного параметра принимается такое значение $\theta = \theta(Y_1, Y_2, \dots, Y_k)$, которое максимизирует функцию L . Однако для упрощения можно максимизировать не саму функцию L , а натуральный логарифм $\lg L$, поскольку максимум обеих функций достигается при одном и том же значении θ : $L^*(Y, \theta) = \lg L(Y, \theta) \rightarrow \max$.

Обозначим через P_i вероятность появления единицы: $P_i = \text{Prob}(Y_i = 1)$. Эта вероятность будет зависеть от $x_i w$, где x_i – строка матрицы регрессоров, w – вектор коэффициентов регрессии: $P_i = P(x_i w)$

В случае бинарной независимой переменной логарифмическая функция правдоподобия равна:

$$L^* = \sum_{i \in m_0} \ln P_i(w) + \sum_{i \in m_1} \ln(1 - P_i(w)) = \sum_{i=1}^k [Y_i \lg P_i(w) + (1 - Y_i) \ln(1 - P_i(w))], \quad (5.3)$$

где m_0, m_1 – множества наблюдений, для которых $Y_i = 0$ и $Y_i = 1$ соответственно.

Для поиска максимума использовался метод Ньютона, который здесь будет всегда сходиться (выполнено условие сходимости метода):

Логистическую регрессию можно представить в виде однослойной ней-

ронной сети с сигмоидальной функцией активации, веса которой есть коэффициенты логистической регрессии, а вес поляризации – константа регрессионного уравнения (рис. 5.3).

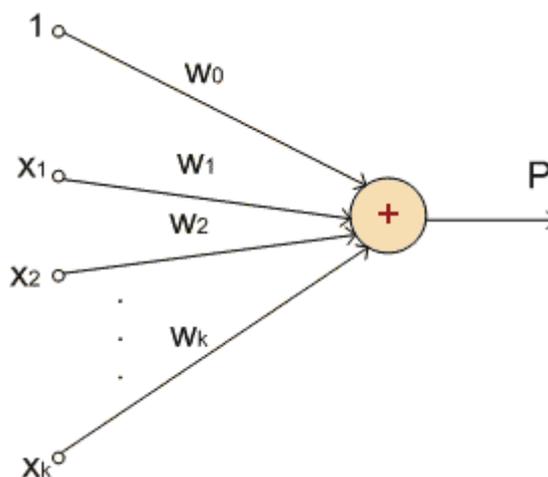


Рисунок 5.3 – Представление логистической регрессии в виде нейронной сети

Для расчета коэффициентов логистической регрессии можно применять любые градиентные методы: метод сопряженных градиентов, методы переменной метрики и другие.

Для обучения нейронной сети используется метод обратного распространения погрешности. Этот алгоритм обучения заключается в распространении сигналов ошибки от выходов нейронной сети к ее входам в направлении, обратном прямому распространению сигналов в обычном режиме работы.

Применение этого подхода для обучения сети дает возможность создать гибкую, легко перестраиваемую иерархию моделей, и его реализация прозрачна и проста при конструировании нейронной сети.

При обучении нейронной сети на данных мониторинга струйного измельчения используется бинарная логистическая регрессия, поэтому для двоичных входных векторов в среднем половина весовых коэффициентов не будет корректироваться [87]. Область возможных значений выходов нейро-

нов $[0,1]$ сдвигается в пределы $[-0.5,+0.5]$, что достигается простыми модификациями логистических функций, т.е. сигмоид с экспонентой преобразуется к виду

$$f(x) = -0.5 + \frac{1}{1 + e^{-\alpha \cdot x}} \quad (5.4)$$

Описанная выше структура обучения называется обучением с учителем, Алгоритм обучения без учителя - "самостоятельное" обучение. Оно заключается в подстраивании весов синапсов. Некоторые алгоритмы изменяют и структуру сети, то есть количество нейронов и их взаимосвязи, но такие преобразования называют более широким термином – самоорганизацией, и в рамках данной работы они рассматриваться не будут. Очевидно, что подстройка синапсов может проводиться только на основании информации, доступной в нейроне, то есть его состояния и уже имеющихся весовых коэффициентов.

Другой алгоритм обучения без учителя – алгоритм Кохонена – предусматривает подстройку синапсов на основании их значений от предыдущей итерации

$$w_{ij}(t) = w_{ij}(t-1) + \alpha \cdot \left[y_i^{(n-1)} - w_{ij}(t-1) \right] \quad (5.5)$$

Из вышеприведенной формулы видно, что обучение сводится к минимизации разницы между входными сигналами нейрона, поступающими с выходов нейронов предыдущего слоя $y_i^{(n-1)}$, и весовыми коэффициентами его синапсов. На шаге 3 из всего слоя выбирается нейрон, значения синапсов которого максимально подходят на входной образ, и подстройка весов по формуле (5.5) проводится только для него. Эта, так называемая, аккредитация может сопровождаться затормаживанием всех остальных нейронов слоя и введением выбранного нейрона в насыщение. Выбор такого нейрона может осуществляться, например, расчетом скалярного произведения вектора весовых ко-

эффицентов с вектором входных значений. Максимальное произведение дает выигравший нейрон.

Пусть k - количество входных векторов множества, тогда множество учебных пар находится в строках матрицы

$$L_{i,j} = \begin{cases} x_{i,j}, & \text{при } 1 \leq j \leq n \\ y_{i,j-n}, & \text{при } n+1 \leq j \leq n+k \end{cases} \quad (5.6)$$

Далее необходимо провести нормирование входных данных и перейти к построению нейронной сети.

Нейросетевой анализ показателей и оценок в ИСИ для мониторинга процесса измельчения и оценки качества измельчения включает следующие этапы:

- 1) предпроцессинг данных;
 - кодирование входов-выходов нейросети;
 - нормировка данных;
- 2) подбор структуры нейронной сети;
- 3) обучение нейронных сетей с различной архитектурой (результат обучения зависит, как от размеров сети, так и от её начальной конфигурации);
- 4) отбор сетей, которые дадут наименьшую ошибку предсказания на тестовых данных;
- 5) оценка адекватности нейросетевой модели.

Построенная нейронная сеть была обучена и протестирована на селективной выборке процесса струйного измельчения. Для оценки качества модели описанной логистической регрессии использовался ROC-анализ.

ROC-кривая (Receiver Operator Characteristic) – кривая, которая наиболее часто используется для представления результатов бинарной классификации. Поскольку классов два, один из них называется классом с положительными исходами, второй – с отрицательными исходами. ROC-кривая показывает зависимость количества верно классифицированных положительных примеров

(истинно положительных) от количества неверно классифицированных отрицательных примеров (ложно отрицательных). При этом предполагается, что у классификатора имеется некоторый параметр (порог или точка отсечения - cut-off value), варьируя который получают то или иное разбиение на два класса. В логистической регрессии порог отсечения изменяется от 0 до 1 – это и есть расчетное значение уравнения регрессии, называемое рейтингом. В зависимости от порога получают различные величины ошибок. Возможны истинно положительные и отрицательные случаи (верно классифицированные положительные примеры – TP и верно классифицированные отрицательные примеры – TN, соответственно), ошибки I рода - положительные примеры, классифицированные как отрицательные (ложно отрицательные примеры – FN), и ошибки II рода - отрицательные примеры, классифицированные как положительные (ложно положительные случаи – FP). При анализе оперируют не абсолютными показателями, а относительными – долями (rates), выраженными в процентах:

$$\text{– доля истинно положительных примеров - } TPR = \frac{TP}{TP + FN} \cdot 100\%,$$

$$\text{– доля ложно положительных примеров - } FPR = \frac{FP}{TN + FP} \cdot 100\%.$$

Поскольку рассматривается оптимальная загрузка мельницы, то положительным исходом будет класс «мельница полная», отрицательным, соответственно, «мельница пустая». В ROC-анализе используется еще два понятия, определяющих объективную ценность бинарного классификатора. Чувствительность $Se = TPR = \frac{TP}{TP + FN} \cdot 100\%$ – это и есть доля истинно положи-

тельных случаев, специфичность $Sp = \frac{TN}{TN + FP} \cdot 100\%$ – доля истинно отри-

цательных случаев, которые были правильно идентифицированы моделью, причем $FPR = 100 - Sp$. Это разные характеристики модели, модель с высокой чувствительностью часто дает истинный результат при наличии положительного исхода (обнаруживает положительные примеры) и, наоборот, модель с

высокой специфичностью чаще дает истинный результат при наличии отрицательного исхода (обнаруживает отрицательные примеры).

При движении вниз за один проход по набору данных, отсортированному по убыванию рейтинга, вычисляются значения всех точек ROC-кривой, последовательно обновляя значения TP и FP. При визуальной оценке ROC-кривых расположение их относительно друг друга указывает на их сравнительную эффективность. Кривая, расположенная выше и левее, свидетельствует о большей предсказательной способности модели.

Однако визуальное сравнение кривых ROC не всегда позволяет выявить наиболее эффективную модель. Иногда используется оценка площади под кривыми AUC: $AUC = \int f(x)dx = \sum_i \left[\frac{x_{i+1} + x_i}{2} \right] \cdot (Y_{i+1} - Y_i)$. Эта оценка может быть получена вычислением площади под многогранником, ограниченным справа и снизу осями координат и слева сверху – экспериментально полученными точками. Теоретически она изменяется от 0 до 1.0, но, поскольку модели всегда характеризуются кривой, расположенной выше положительной диагонали, то обычно говорят об изменениях от 0.5 ("бесполезный" классификатор) до 1.0 ("идеальная" модель). Можно считать, что чем больше показатель AUC, тем лучшей прогностической силой обладает модель.

Идеальная модель обладает 100% чувствительностью и специфичностью. На практике добиться этого невозможно, как невозможно одновременно повысить и чувствительность, и специфичность модели. Эта проблема решается с помощью нахождения оптимального порога отсечения, т.к. пороговое значение влияет на соотношение Se и Sp . Порог отсечения нужен для того, чтобы применять модель на практике: относить новые примеры к одному из двух классов. Для определения оптимального порога задается критерий его определения - требование баланса между чувствительностью и специфичностью. Тогда порог есть точка пересечения двух кривых, когда по оси X откладывается порог отсечения, а по оси Y – чувствительность или специфичность модели.

На рис. 5.4 показан результат ROC-анализа построения нейронной сети для процесса измельчения шлака фракции -1,0+0,4мм, адекватность AUC= 0.734.

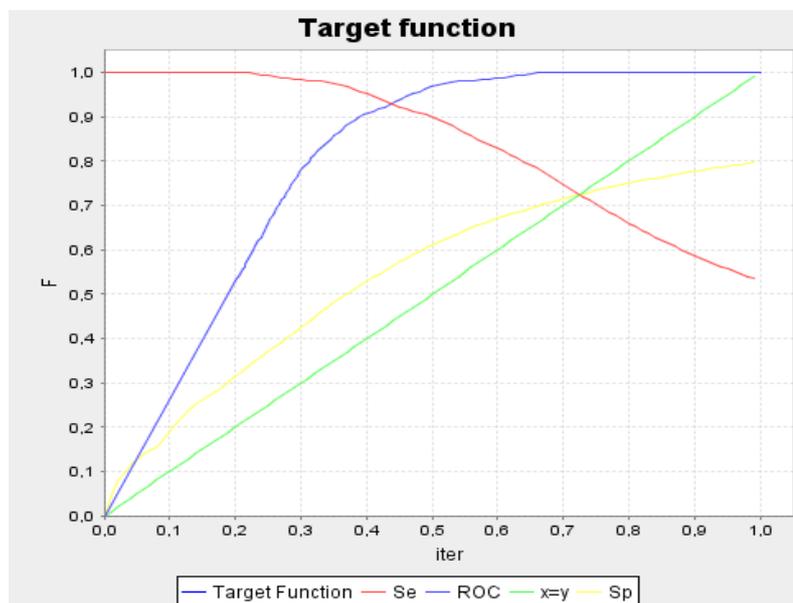


Рисунок 5.4 – Результаты ROC-анализа построения нейронной сети

Таким образом, с помощью ROC-анализа проводится оценка адекватности модели, подсчитываются пороги отсечения. Предварительно определяется шаг смещения границы во время анализа ROC-кривых. Для объекта, который необходимо классифицировать, на основании уравнений логистической регрессии подсчитываются значения $y_l (l=1,..m)$. Если $y_l < \text{best-Bound}[l]$, то объект не принадлежит j , поэтому класс и значения y_j исключается из дальнейшего рассмотрения. Такой подход использовался при определении наполненности струй материалом и необходимости загрузки материала в мельницу.

Проведенная обработка данных мониторинга процесса измельчения шлака по описанной методике позволила выявить информативные частоты: $\varphi \approx 70 \text{ кГц}$, что подтверждается экспериментальными данными (рис. 5.1). Проведен анализ на адекватность полученных моделей:

- моделей, рассматривающих все классы частот ($\varphi \leq 100 \text{ кГц}$);
- моделей, построенных на выбранном диапазоне информативных частот

($69 \text{ кГц} \leq \varphi \leq 72 \text{ кГц}$, классы $355 \leq i \leq 370$).

В последнем случае обучение нейронов осуществилось значительно быстрее, и показатели специфичности – выше, что говорит о правильности распознавания состояния разгрузки мельницы (рис. 5.5).

ROC анализ									
Всего угадано									
Отчет по классам									
Модель по всем частотам									
Класс	TP	TN	FP	FN	SE	SP	Порог		
класс 0.0 - ...	19	61	10	24	0.4419	0.8592	0.4034		
класс 1.0 - ...	60	37	6	11	0.8451	0.8605	0.496		
Модель по информативным частотам									
Класс	TP	TN	FP	FN	SE	SP	Порог		
класс 0.0 - ...	6	71	4	43	0.0	0.9641	0.0279		
класс 1.0 - ...	60	37	6	11	0.8451	0.8605	0.4776		

Рисунок 5.5 – Результаты ROC анализа двух моделей

При этом разработанный алгоритм позволяет получить аналитический вид множественной логистической регрессии [87].

На основе нейросетевого моделирования создана информационная система измельчения. На последнем этапе ИСИ осуществляется анализ результатов, на основе которого выдаются рекомендации по дальнейшему ходу процесса измельчения – продолжать измельчение, добавлять материал в струи, корректировать параметры измельчения или полностью прекращать процесс. На рис. 5.6 представлена общая схема ИСИ.

Информационная технология на базе нейронной сети вида множественной логистической регрессии позволяет определить информационную значимость частот измельчения для двух состояний мельницы: режим измельчения и режим ожидания (пустая мельница).

Согласно полученным результатам установлено, что качество модели, построенной для состояния пустой мельницы по отобранным информативным частотам, улучшилось на 11% (по всем частотам составила 85%, по информативным частотам 96%).

Отобранные показатели с максимальной информативностью целесообразно использовать для контроля эффективности процесса измельчения.

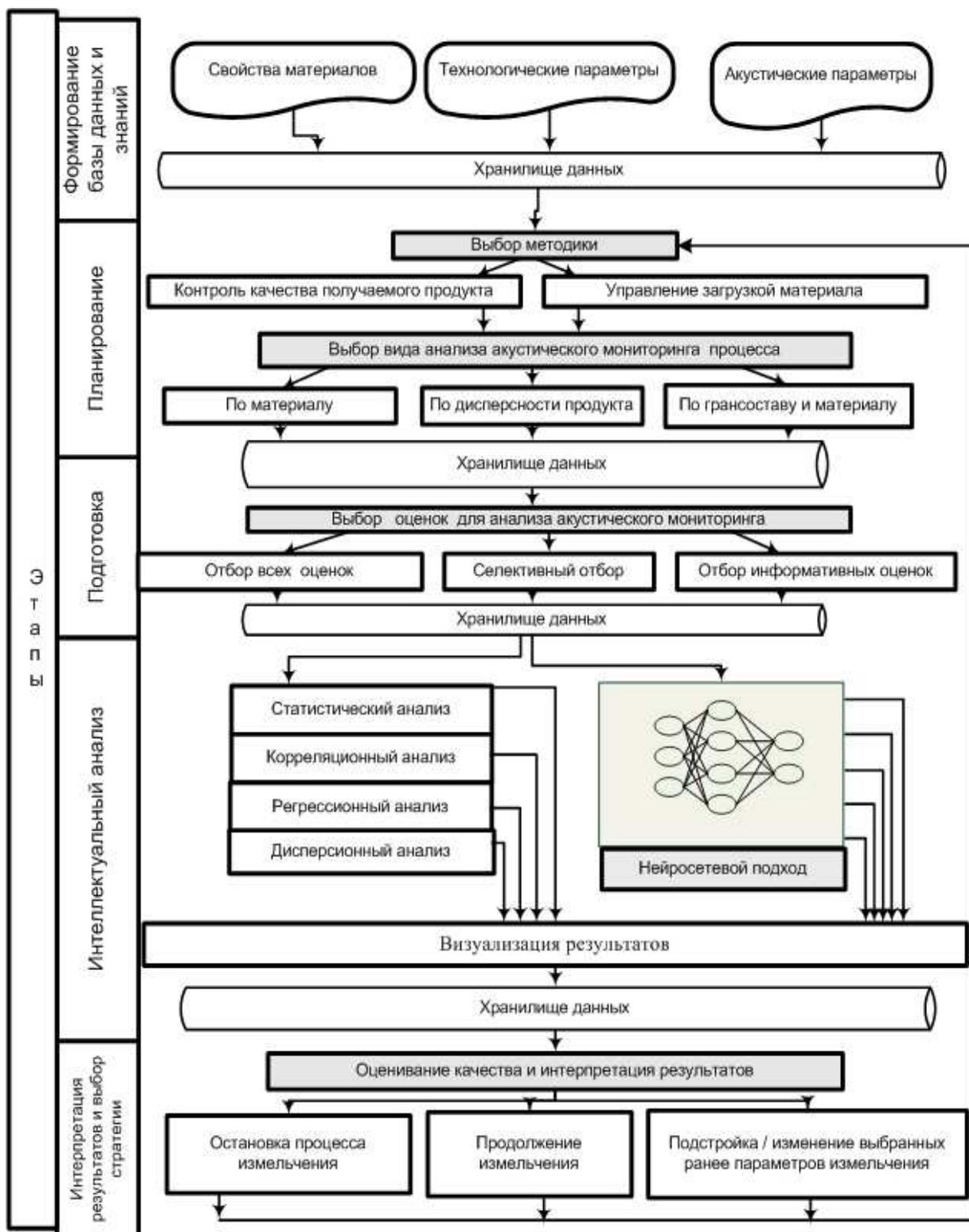


Рисунок 5.6 – Общая схема нейросетевой технологии анализа режимов струйного измельчения

Качество и адекватность результатов моделирования процесса исследованы на репрезентативной контрольной выборке.

Согласно полученным результатам установлено, что качество модели, построенной для состояния пустой мельницы по отобранным информативным частотам, улучшилось на 11% (по всем частотам составила 85%, по информативным частотам 96%).

Отобранные показатели с максимальной информативностью целесообразно использовать для контроля эффективности процесса измельчения. Качество и адекватность результатов моделирования процесса исследованы на репрезентативной контрольной выборке.

По результатам проведенных исследований можно утверждать о применимости разработанной методики определения информативных параметров процесса измельчения и на ее основе создания информационной технологии процесса струйного измельчения.

Разрабатываемая информационная система сочетает в себе большой объем экспериментальных данных измельчения различных материалов, преимущества акустического мониторинга процесса, позитивные качества интеллектуального анализа результатов исследования, а также позволяет совершенствовать методику акустического мониторинга и принимать решения по повышению эффективности и качества струйного измельчения. Реализация описанного подхода в целом является поддержкой принятия решения по оптимизации процесса измельчения.

Отобранные показатели с максимальной информативностью целесообразно использовать для контроля эффективности процесса измельчения. Качество и адекватность результатов моделирования процесса исследованы на репрезентативной контрольной выборке.

По результатам проведенных исследований можно утверждать о применимости разработанной методики определения информативных параметров процесса измельчения и на ее основе создания информационной технологии процесса струйного измельчения.

Разрабатываемая информационная система сочетает в себе большой объем экспериментальных данных измельчения различных материалов, преимущества акустического мониторинга процесса, позитивные качества интеллектуального анализа результатов исследования, а также позволяет совершенствовать методику акустического мониторинга и принимать решения по повышению эффективности и качества струйного измельчения. Реализация описанного подхода в целом является поддержкой принятия решения по оптимизации процесса измельчения.

5.3 Нейросетевая идентификация процесса измельчения

Процесс струйного измельчения, исследуемый с помощью акустического мониторинга, можно рассматривать как динамическую систему. В [43] определяется динамическая система как любой объект или процесс, для которого однозначно определено понятие состояния, как совокупности некоторых величин в данный момент времени, и задан закон, который описывает изменение (эволюцию) начального состояния с течением времени.

Если понимать идентификацию как построение графического и математического образов состояния объекта по последовательности значений измеренного параметра [88], то на основе акустического мониторинга параметров процесса струйного измельчения можно идентифицировать состояние процесса и оценить его устойчивость.

Согласно [89] процесс идентификации процесса измельчения включает этапы:

- проведение экспериментов и предварительной обработки полученных результатов;
- выбор модельной структуры;
- оценка модели (структурная оптимизация параметров);
- принятие решения об адекватности модели.

Для осуществления процесса обучения нейросетевой идентификацион-

ной модели необходимо существование определенной статической информации – шаблонов базы данных вида «вход-выход». Эти данные представляются в виде множества $M\{X_i, Y_i\}, i=1, N_M$, где X_i, Y_i – входные и выходные данные, соответственно; N – определенное количество данных.

Отличие информационной технологии и создаваемой методики идентификации процесса измельчения от наиболее близкой интеллектуальной идентификации и управления обогатительным процессом магнитной сепарации [90] обусловлено самим типом процесса. При обогащении магнетитовых кварцитов необходимо разделять локальные технологические процессы (измельчение, классификацию, магнитную сепарацию). В рассматриваемой работе струйное измельчение, как измельчение замкнутого цикла, является непрерывным и неделимым процессом, включающим измельчение и классификацию. Поэтому в этом случае при создании информационной технологии и математической модели необходимо оптимизировать по крайней мере два процесса и контролировать несколько параметров, порой слабо связанных между собой, например, качество получаемого продукта и степень загрузки струй материалом. Таким образом, при моделировании выделяются главные, ведущие контролируемые параметры и вторичные, опосредованно вычисляемые параметры.

В ходе создания модели процесса газоструйного измельчения необходимо было решить несколько задач:

- 1) проанализировать амплитудные и частотные составляющие сигналов с шумами и без них;
- 2) выделить и проанализировать информативные частоты;
- 3) сравнить параметры акустических сигналов при различных режимах наполнения струй материалом.

Исследования показали возможность нейрорегулирования в одноканальном случае, т.е. при использовании записей акустических сигналов в зоне измельчения. На основе информационной модели разрабатывается многоканальная математическая модель. При акустическом мониторинге струйного

измельчения записываются в БД акустические сигналы после классификационной зоны [93]. Это дает возможность судить о качестве получаемого продукта при заданных технологических параметрах процесса.

Преимуществом использования описанного выше нейруправления на основе БД является то, что существование математической модели необязательное предварительное условие. При этом реализация многоканальных систем интеллектуального управления нелинейными объектами может достаточно успешно осуществляться на основе обычных схем инверсной динамики [88] со специализированным или обобщенным обучением на данных предварительного эксперимента. В данной работе на первом этапе математического моделирования проводилось предварительное обучение нейросети на данных акустического мониторинга процесса, записанных в БД. Затем использовался метод специализированного обучения в оперативном (On-Line) режиме. Получаемые текущие акустические сигналы обрабатывались в нейронных сетях и сравнивались с «эталонными» сигналами, соответствующими режимам измельчения. Далее проводился анализ на особые состояния системы, т.е. использовалась технология классификационного управления. Для этого разрабатывалась процедура кластеризации, а затем классификации похожих ситуаций (режимов) по признакам близости к текущему состоянию системы. Эти процедуры реализовались на основе нейронной сети. В результате принималось решение о продолжении или изменении режима измельчения и классификации (дозагрузка струй материалом или изменение числа оборотов классификатора). На рис. 5.7 приведен алгоритм структурной системы управления процессом струйного измельчения на основе акустического мониторинга.

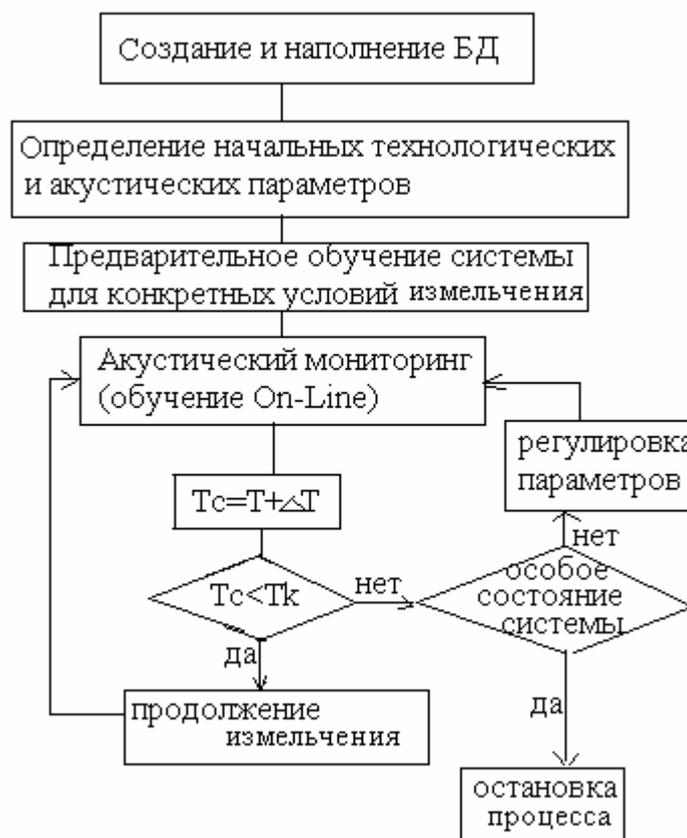


Рисунок 5.7 – Алгоритм схемы управления процессом измельчения

Таким образом, соединение принципов идентификации, нейросетевой кластеризации и классификации дает возможность создать интеллектуальную систему управления процессом измельчения.

5.4 Анализ акустоэмиссионной информации графическими методами

Развитие компьютерных технологий, создание специализированных программ для графического представления данных MATLAB дает возможность представления данных на новом, качественно более высоком уровне. Для восприятия данных в таком виде требуется меньше времени, нежели при традиционном представлении их в цифровом и примитивно графическом ракурсе. Кроме того, такое представление данных открывает новое видение проблемы, ставит новые задачи. Разработанные алгоритмы визуализации, в частности, позволяют выявить новый путь распознавания загруженности

мельницы по АС.

Исследование АС в обеих исследуемых зонах (зоне измельчения и зоне после классификатора) одновременно на различных стадиях измельчения показали зависимость акустических параметров от степени загрузки струй материалом. Наполнение базы данных сигналами акустического мониторинга процесса измельчения и разработка информационной системы измельчения дали возможность визуализировать результаты анализа амплитуд акустических сигналов. Под задачей визуализации мониторинга АС мельницы будем понимать следующее. По данным наблюдений вида $\{t_i, A_i^m, A_i^k; i = \overline{1, N}\}$, где N - количество записей сигналов в секунду ($i = \overline{1, N}$); двойка $\{t_i, A_i^m; i = \overline{1, N}\}$ - определяет кинетику амплитуд сигнала в мельнице; $\{t_i, A_i^k; i = \overline{1, N}\}$ - определяет кинетику амплитуды сигнала после классификатора мельницы. По результатам акустического мониторинга строится плотность распределения вероятностей приближения амплитуд - функция $p(A^m, A^k)$, реализацией которой являются наблюдаемые массивы амплитуд.

Реализация задачи визуализации осуществляется на основе регуляризованных данных мониторинга мельницы после подавления шума с помощью вейвлет-анализа, для чего используется вейвлет Добеши второго порядка. Восстанавливаемая функция плотности распределения вероятностей является функцией Гаусса $p(A^m, A^k)$. Анализ плоской и объемной картины функции плотности вероятностей $p(A^m, A^k)$ акустических сигналов процесса измельчения материалов различной плотности позволяет судить о загруженности мельницы материалом.

Ниже приведен алгоритм методики решения сформулированной задачи.

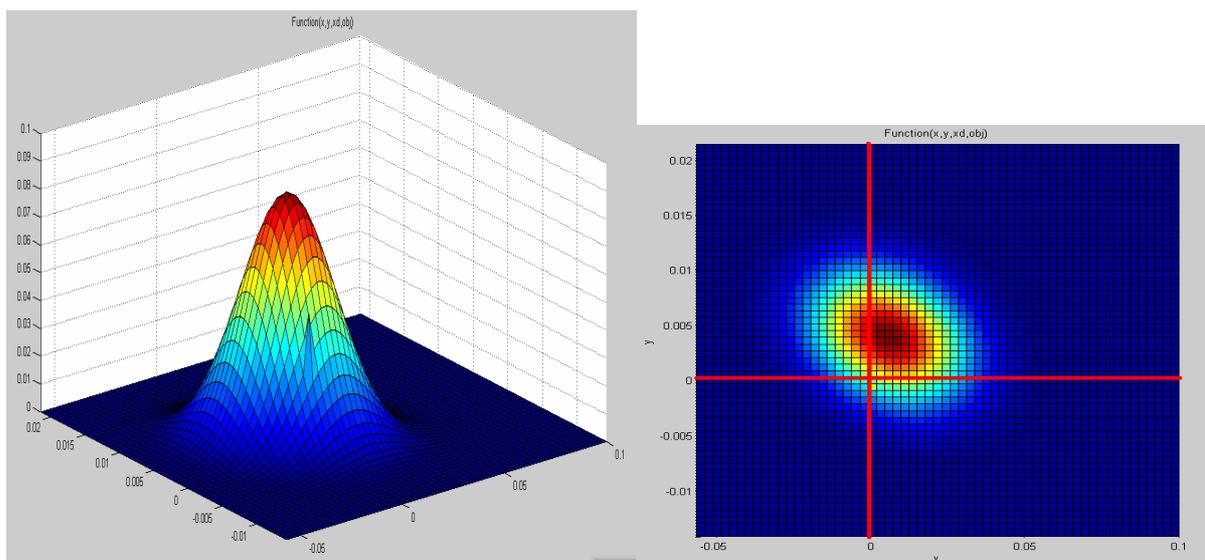


Рисунок 5.8 – Алгоритм решения задачи визуализации

Так, при анализе акустических сигналов рабочего процесса измельчения кварца площадь сечения графика функции $p(A^m, A^k)$ координатной плоскостью (Oxy) в два раза больше аналогичной площади в режиме разгрузки (рис. 5.9 б и 5.10 б). При этом пик функции в объемном представлении (рис. 5.9.а и 5.10.а) результатов рабочего режима измельчения в три раза выше соответствующего представления сигналов режима разгрузки. На рис. 5.9 и рис. 5.10 показано расположение функции плотности распределения вероятности для двух режимов загрузки мельницы.

Предлагаемое графическое дополнение к анализу данных АС в виде графиков поверхности распределения вероятности значений АС и его проекции на плоскость дает дополнительную информацию об особенностях поведения АС, помогает в определении состояния загруженности мельницы. Наглядность графиков дает более целостное восприятие загруженности мель-

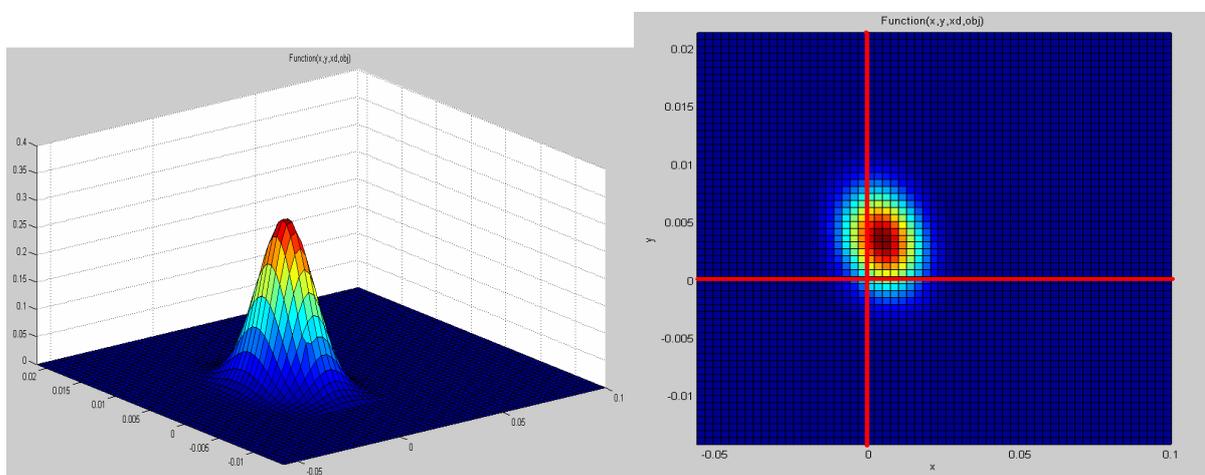
ницы, разброса значений АС, превалирования тех или иных значений АС.



а)

б)

Рисунок 5.9 – Поверхность функции плотности распределения вероятности значений амплитуд сигналов (а) и ее проекция (б) в рабочем режиме измельчения



а)

б)

Рисунок 5.10 – Поверхность функции плотности распределения вероятности значений амплитуд сигналов (а) и ее проекция (б) в режиме разгрузки мельницы

5.5 Графическая идентификация оптимальных режимов измельчения

Разработанная информационная технология струйного измельчения [94] основана на информационной системе акустического мониторинга, включающей базы данных акустических сигналов (АС) процесса измельчения сыпучих материалов, данных о соответствующих технологических режимах и свойствах исходных материалов и получаемых продуктов.

Установленные закономерности кинетики АС зоны помола, их связи с производительностью струйной мельницы позволили предложить использование их для разработки системы управления этим процессом. В аспекте снижения энергетических затрат система регулирования процесса струйного измельчения должна обеспечить своевременную подачу порций загружаемого в струи материала в количестве, достаточном для поддержания оптимальных параметров акустического излучения зоны помола.

Графическая идентификация режимов измельчения основана на установленной зависимости величины амплитуды АС от степени загрузки струй измельчаемым материалом, а, следовательно, от режима измельчения. По значению амплитудно-частотных характеристик АС, записываемых в процессе измельчения, можно достаточно корректно определить текущий режим измельчения: загрузка материала, рабочий режим, недостаточная заполненность мельницы материалом и недопустимый режим – пустая мельница.

Для анализа акустических характеристик процесса измельчения в ходе мониторинга выбирались сигналы за интервалы 0,1 с в различных режимах измельчения. Весь спектр частот разбивался на N классов по 195 частот в каждом, всего 500 классов. На рис. 5.11 показано изменение величины амплитуды и частоты АС при измельчении шлака с периодической загрузкой мельницы, где рис. 5.11 а) – исходные записи сигналов, рис. 5.11 б) - характеристики разности исходных сигналов и шума пустой мельницы, т.е. фактически характеристики сигналов измельчаемого материала.

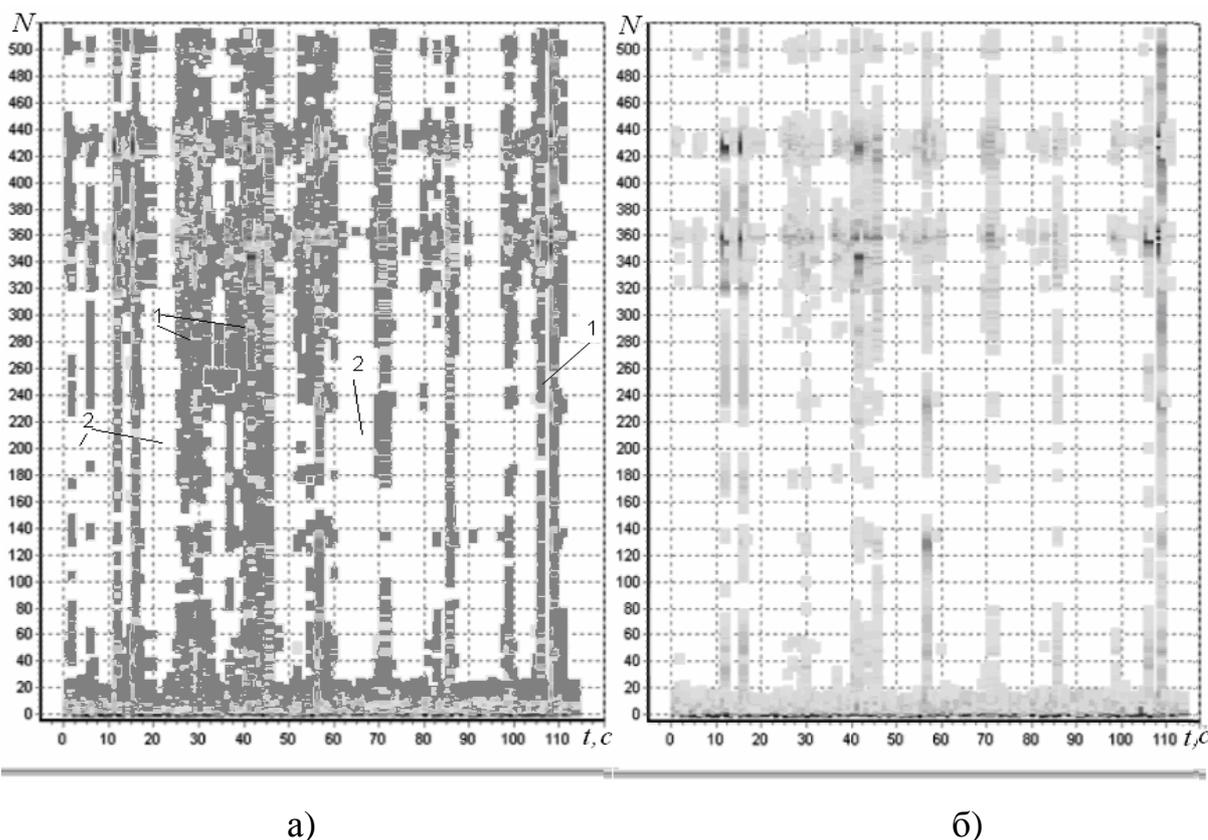


Рисунок 5.11 – Изменение амплитудно-частотных характеристик сигналов при изменении загрузки мельницы материалом.

Для достаточной загрузки (заполнения) мельницы, т.е. при рабочем режиме измельчения, амплитуды АС разной частоты показаны на рис. 5.11 серым цветом, при недопустимо малой загрузке мельницы амплитуда сигналов показана белым цветом.

Как видно из распределения характеристик режимы пустой мельницы и рабочего режима хорошо отличаются. Например, холостой ход и пустая мельница наблюдалась на секундах 4, 9, 21 - 25, 48 - 50 и т.д. Рабочий режим соответствовал записям АС на 10, 15, 40, 46 с.

Для выявления информативных частот АС определена амплитуда шума мельницы и вычтена из величины амплитуд сигналов. В этом случае (см. рис. 5.11б) более четко выделены сигналы рабочего режима, обладающие большей амплитудой. Замечены частоты сигналов, характерные для процесса измельчения: это частоты классов 320 – 360 и 420 – 440. Эти классы соответствуют частотам 68 – 72 кГц и 83 – 85 кГц.

Эти результаты совпадают с ранее проведенными исследованиями. На основе обработки данных мониторинга (частота регистрации АС 200кГц) процесса измельчения с помощью нейросетевого подхода [94] были определены информативные частоты $f \approx 70\text{кГц}$ и построена модель на соответствующем диапазоне информативных частот ($69\text{кГц} \leq f \leq 72\text{кГц}$). Обучение нейронов такой модели осуществилось значительно быстрее, и показатели специфичности при ROC-анализе адекватности модели были выше, что говорит о правильности распознавания состояния разгрузки мельницы.

Общая картина распределения амплитудно-частотных характеристик процесса измельчения шлака с периодической загрузкой материала представлена на рис. 5.12, где также видны области информативных частот.

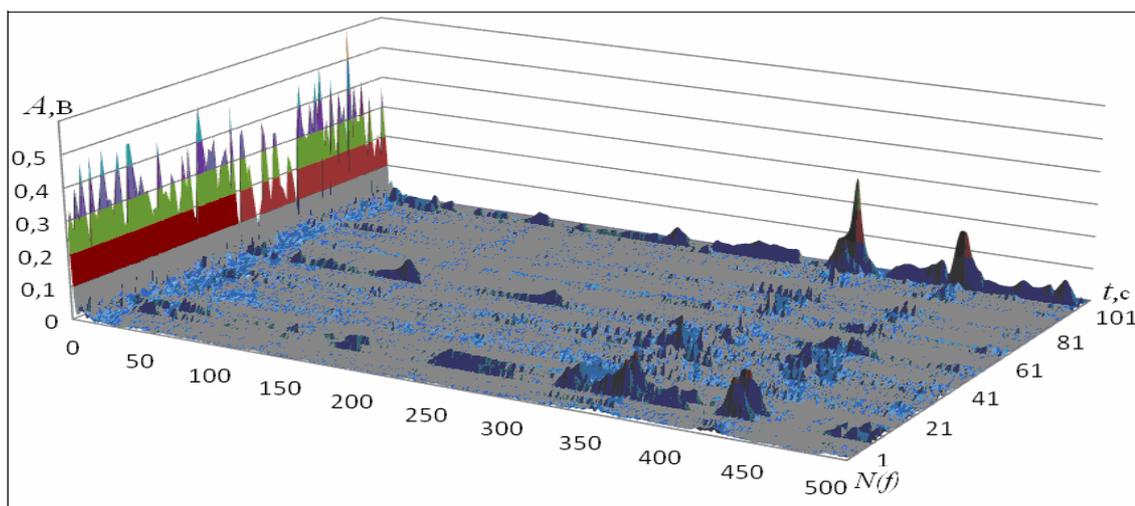


Рисунок 5.12 – Кинетика амплитудно-частотных характеристик при измельчении шлака

Подробные исследования были проведены для одного цикла загрузки мельницы. По аналогичной методике были выбраны АС в интервалах длительностью $\Delta t = 1\text{с}$ на протяжении одного периода измельчения загруженной порции кварцевого песка Вольногорского месторождения. На рис. 5.13 показана величина амплитуды АС разной частоты в ходе измельчения.

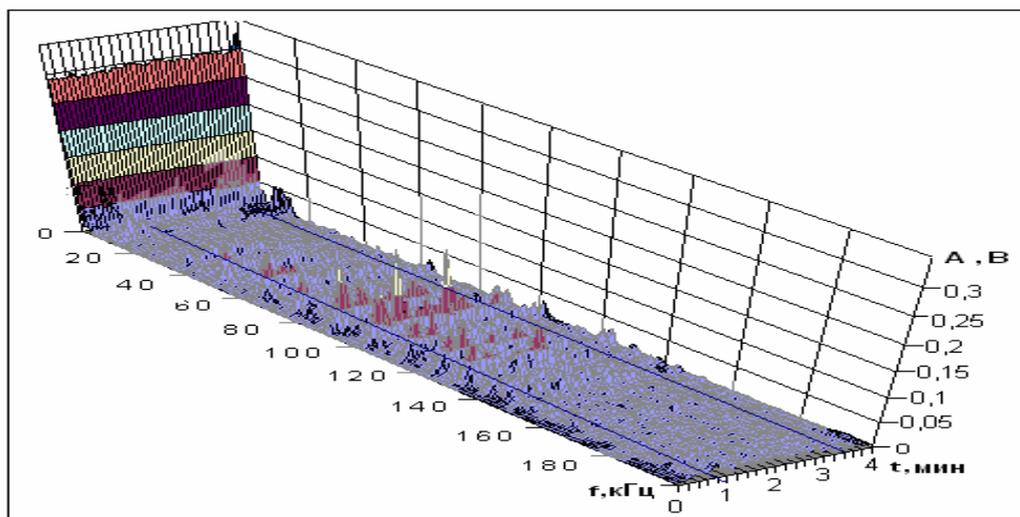


Рисунок 5.13 – Величина амплитудно-частотных характеристик при разных режимах измельчения: $0 \leq t \leq 1$, мин – начало загрузки материала; $1 \leq t \leq 3,5$, мин – рабочий режим измельчения; $3,5 \leq t \leq 4,0$ мин – недостаточная загрузка мельницы

Частота регистрации сигналов составила 400кГц, поэтому спектр информативных частот расширился и был определен как $65 \text{ кГц} \leq f \leq 125 \text{ кГц}$. В рабочем режиме измельчения $1 \text{ с} \leq t \leq 3,5 \text{ с}$ величина амплитуд АС больше, чем на начальном этапе загрузки и, что более важно, чем на заключительном этапе измельчения, т.е. при недогруженной мельнице. Особенно это характерно для сигналов с частотой, попадающей в диапазон информативных.

Эти результаты согласуются с промышленными испытаниями на Волгоградском керамическом заводе [95]. При струйном измельчении керамического сырья использовался другой аппаратный комплекс для регистрации АС, однако в блок регистрации сигналов входил тот же широкополосный датчик. Записывались внутренние АС с частотой до 125 кГц, информативная частота сигналов составила 63 кГц и изменение активности АС составило 20 - 25Дб.

При исследовании процесса струйного измельчения изучалась энергетическая характеристика АС. На рис. 5.14 показано изменение энергии сигналов разной частоты в ходе струйного измельчения кварцевого песка.

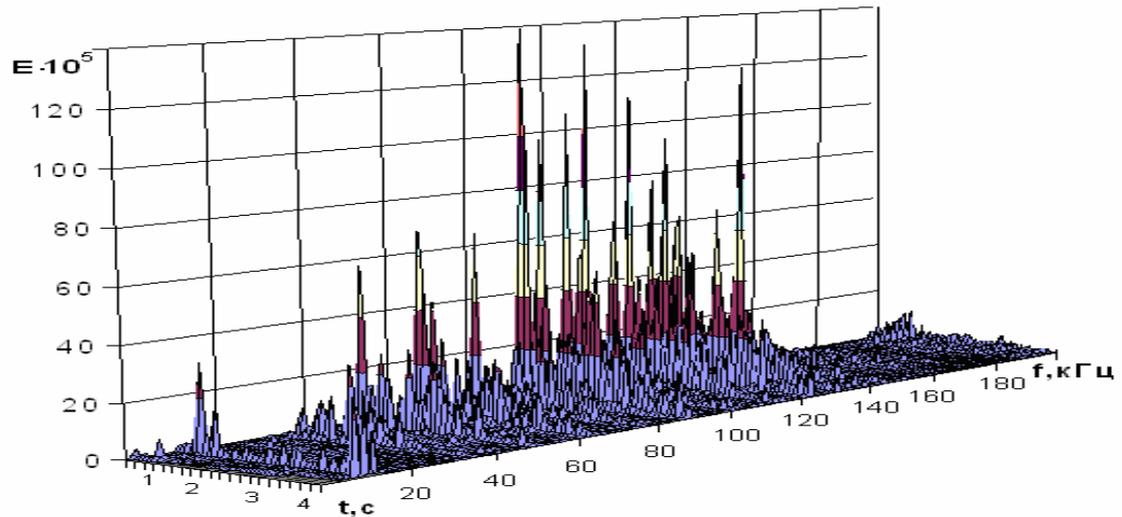


Рисунок 5.14 – Распределение энергии АС по частотным полосам в ходе измельчения кварцевого песка

Установлено, что в процессе измельчения энергия сигналов меняется, причем наибольшей энергией обладают сигналы рабочего режима, режима диспергирования частиц. Это вполне объяснимо, т.к. диспергирование является завершающим актом разрушения. По современным представлениям диспергирование - это процесс разделения деформируемого твердого тела на изолированные отдельности в активных локальных зонах вблизи дефектов структуры по достижении критического (предельного) состояния вещества на неустойчивой авторезонансной стадии предразрушения под действием акустических волн [96], возникающих при автоколебательном движении атомов в этих зонах. В критическом состоянии достигается максимальный уровень накачки материала энергией, при котором формируются и растут микротрещины, образуются тонкодисперсные фракции.

Проведенное изучение данных информационной системы акустического мониторинга позволило установить диапазон информационных частот АС. По поведению, изменению величины амплитуд сигналов этих частот можно судить о режиме измельчения. На начальном этапе процесса измельчения задаются критические величины $A_{кр}$ амплитуды этих сигналов. Затем в ходе

мониторинга происходит уменьшение исходной величины A амплитуды до контрольной ($A \leq A_{кр}$). Приближение амплитуды к контрольной величине обозначает переход рабочего режима измельчения к неполной загрузке мельницы, а дальнейшее уменьшение величины амплитуды до $A \ll A_{кр}$ ведет к остановке процесса измельчения. Поэтому при управлении процессом измельчения условие $A \approx A_{кр}$ является необходимым условием дозагрузки мельницы для продолжения измельчения материала в оптимальном рабочем режиме.

5.6 Определение оптимальных режимов измельчения на основе анализа акустических сигналов

Для контроля степени заполнения газоструйной мельницы измельчаемым материалом проведено исследование показателей хаотичности акустических ритм-сигналов, записанных в процессе мониторинга измельчения.

Для анализа использовались следующие показатели хаотичности сигналов: экспонента Ляпунова, вычисленная «методами аналогов» Вольфа и др.; нормированная энтропия; показатель Херста, вычисленный по методу R/S; диаграмма Пуанкаре; вейвлет-разложение.

Для определения степени заполнения мельницы вычислялись значения приведенных выше показателей АС мельницы в двух состояниях: в рабочем режиме, когда материал загружен; в холостом режиме, когда мельница работает без материала.

В табл. 5.1 приведены основные показатели хаотичности в исследуемых режимах.

Диаграммы Пуанкаре для акустических сигналов мельницы в холостом и рабочем режимах работы с датчика помольной камеры приведены на рис. 5.15.

Для рассмотренных случаев можно сделать следующие выводы. Присутствие положительного показателя Ляпунова говорит о хаотичности процесса, однако в данном случае его малость показывает, что система работает стабильно

и не переходит быстро в хаос. Коэффициент Херста во всех приведенных случаях показывает, что система персистентная, при этом значения нормированной энтропии не выходят за пределы нормы. Более полный анализ коэффициентов Херста приведен в Приложении Е (Методика анализа работы мельницы с использованием показателей Херста сигналов акустического мониторинга).

Таблица 5.1

Показатели	Датчик в помольной камере		Датчик за классификатором	
	холостой ход	рабочий режим	холостой ход	рабочий режим
коэффициент Ляпунова	0 - 0,004	0 - 0,002	0 - 0,0034	0 - 0,002
энтропия	0,24 - 0,35	0,29 - 0,36	0,19 - 0,34	0,22 - 0,32
коэффициент Херста	0,49 - 0,56	0,49 - 0,54	0,49 - 0,60	0,52 - 0,58

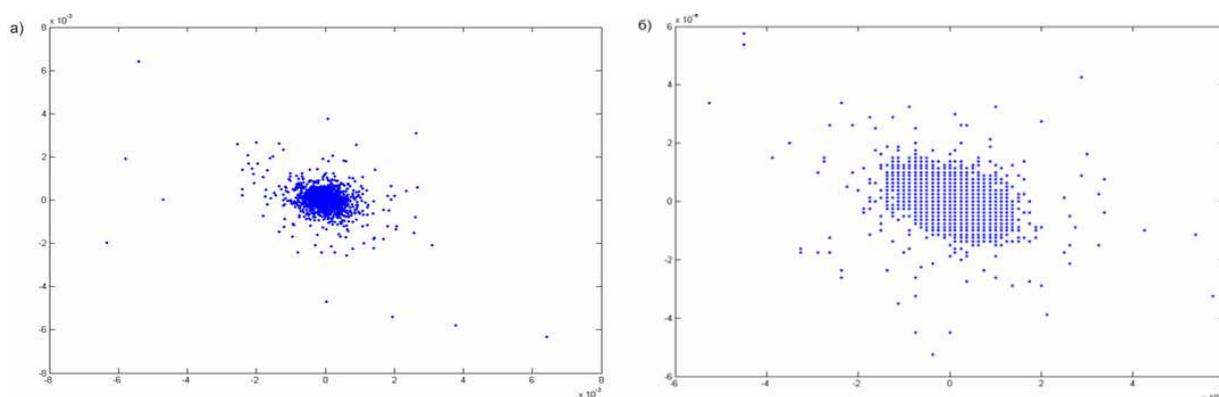


Рисунок 5.15 – Диаграммы Пуанкаре для двух режимов работы мельницы: а) диаграмма Пуанкаре для рабочего режима мельницы, б) диаграмма Пуанкаре для холостого режима мельницы

Изучив значения этих показателей, можно сделать вывод о том, что для данных режимов они не являются информативными при определении степени заполнения мельницы. Дальнейшие исследования сигналов помольной зо-

ны мельницы проводилось на основе вейвлет-анализа [97, 98].

Вейвлет-преобразования рассматривают анализируемые временные функции в терминах колебаний, локализованных по времени и частоте. Как правило, вейвлет-преобразования (WT) подразделяют на дискретное (DWT) и непрерывное (CWT). DWT используется для преобразований и кодирования сигналов, CWT - для анализа сигналов. Вейвлетный анализ представляет собой особый тип линейного преобразования сигналов и физических данных. Базис собственных функций, по которому проводится вейвлетное разложение сигналов, обладает многими специфическими свойствами и возможностями. Вейвлетные функции базиса позволяют сконцентрировать внимание на тех или иных локальных особенностях анализируемых процессов, которые не могут быть выявлены с помощью традиционных преобразований Фурье и Лапласа, т.к.. вейвлеты способны с гораздо более высокой точностью представлять локальные особенности сигналов, вплоть до разрывов 1-го рода (скачков).

При вейвлет-анализе данных акустического мониторинга струйного измельчения использовался алгоритм Малла с применением 4-го вейвлета Добеши.[97]

$$\begin{aligned} C_{m+1,k} &= \sum_n g_n C_{m,2k+n}, \\ D_{m+1,k} &= \sum_n h_n C_{m,2k+n}, \end{aligned} \quad (5.7)$$

где $C_{0,k} = s(k)$ – исходный сигнал,

g_n, h_n – импульсные переходные характеристики для выделения низких и высоких частот соответственно, построенные на основе вейвлета Добеши.

Вейвлет-разложение акустических сигналов процесса измельчения вейвлетом Добеши-4 до третьего уровня показало наличие зависимости частоты от времени всех исследуемых АС. В то же время исследование среднеквадратических отклонений полученных детализирующих вейвлет-коэффициентов

($cD1$, $cD2$, $cD3$) и восстановленных компонент сигнала ($ScD1$, $ScD2$, $ScD3$) мельницы в холостом и рабочем режимах (табл. 5.2) с датчика, расположенного в помольной камере, показали, что вейвлет-коэффициенты двух различных режимов различаются почти в два раза. Поэтому они достаточно хорошо определяют степень заполнения мельницы.

Таблица 5.2

Коэффициенты вейвлет-разложения

	значения	$cD1$	$cD2$	$cD3$	$ScD1$	$ScD2$	$ScD3$
Холо- стой ход	минимальное	0,0082	0,0045	0,0041	0,0058	0,0022	0,0014
	максимальное	0,0151	0,0084	0,0069	0,0107	0,0042	0,0024
Рабочий режим	минимальное	0,0289	0,0199	0,0196	0,0204	0,0099	0,0069
	максимальное	0,0490	0,0273	0,031	0,0346	0,0136	0,0109

Спектрограммы непрерывного вейвлет-преобразования для акустических сигналов мельницы в холостом и рабочем режимах работы с датчика помольной камеры приведены на рис. 5.16.

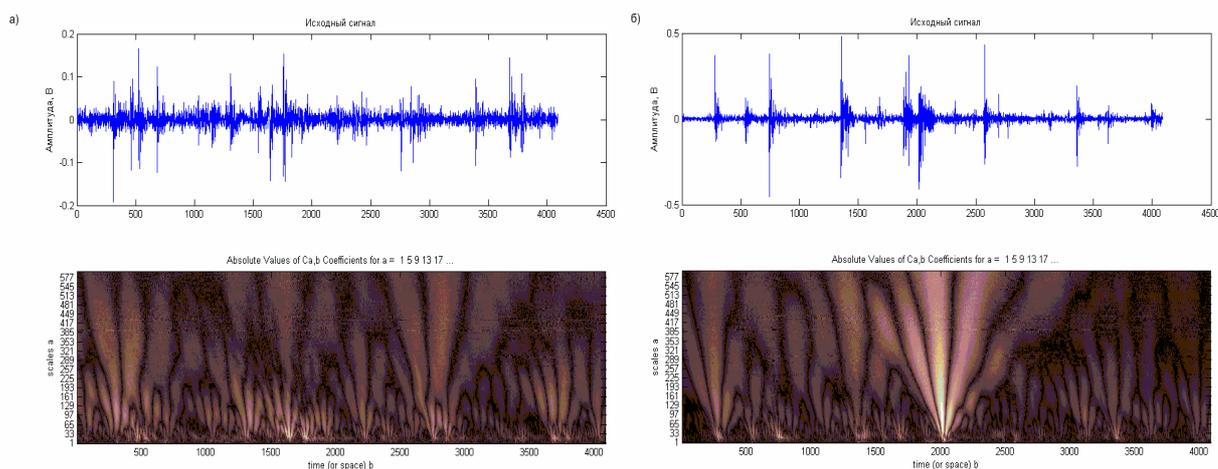


Рисунок 5.16 – Спектрограммы непрерывного вейвлет-преобразования: а) спектрограмма для рабочего режима мельницы, б) спектрограмма для холостого режима мельницы

Поскольку при анализе акустического сигнала необходимо было оценить его вариабельность, в работе использовался детализирующий вейвлет-коэффициент ($D1, D2, D3$), который показывает флуктуацию исходного сигнала относительно его аппроксимации. Вейвлет-разложение производилось до 3-го уровня разложения, но поскольку результаты практически совпадают, в работе приведен только 1-й уровень. Для более явного численного выражения различия акустических сигналов были найдены стандартные отклонения вычисленных детализирующих коэффициентов ($cD1, cD2, cD3$).

$$cD_j = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (D_{i,j} - \bar{D}_j)^2}, \quad (5.8)$$

где $j = \overline{1,3}$ – уровень вейвлет-разложения.

На рис. 5.17 представлены стандартные отклонения детализирующих вейвлет-коэффициентов 1 уровня режима разгрузки (а) мельницы и рабочего режима (б) измельчения кварцевого песка, регистрировались сигналы в зоне измельчения, частота регистрации 400кГц, τ - номер промежутка времени длиной $\Delta t = 0,01$ с.

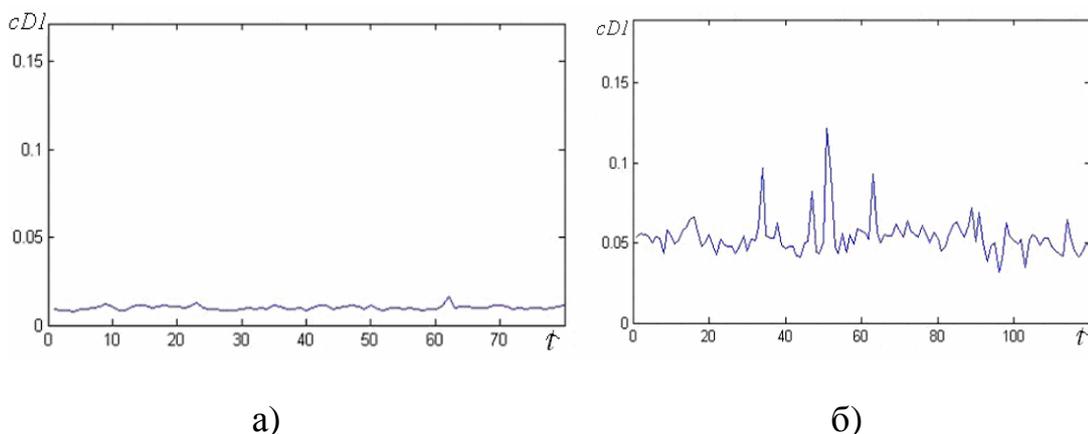


Рисунок 5.17 – Стандартное отклонение детализирующего вейвлет-коэффициента 1 уровня для разных режимов измельчения

Анализ полученных результатов показывает значительное отличие вейвлет-коэффициентов для данных рабочего режима и режима разгрузки мельницы. Этот факт дает основание говорить о возможности создания системы управления загрузкой мельницы по величине оценок детализирующего вейвлет-коэффициента, вычисляемого в ходе акустического мониторинга процесса измельчения.

Проведенный аналогичный вейвлет-анализ данных измельчения материалов различной плотности и размеров исходных частиц показал, что величина вейвлет-коэффициентов сигналов полупустой мельницы при их измельчении имеет одинаковое значение.

На рис. 5.18 представлены результаты анализа измельчения газового угля с удельной поверхностью $S_{y\partial}=0,99 \text{ м}^2/\text{г}$ при $n=1800 \text{ мин}^{-1}$ (рис. 5.18 а); кварцевого песка Вольногорского месторождения, измельченного при разных режимах классификации: $n=1800 \text{ мин}^{-1}$, $S_{y\partial} = 0,46 \text{ м}^2/\text{г}$ (рис. 5.18 б) и $n=3000 \text{ мин}^{-1}$, $S_{y\partial} = 0,67 \text{ м}^2/\text{г}$ (рис. 5.18 в).

При вейвлет-анализе акустических сигналов рабочего режима измельчения материалов различных характеристик плотности (газовый уголь $\rho = 1,4 \text{ г}/\text{м}^3$ и кварцевый песок $\rho = 2,65 \text{ г}/\text{м}^3$) и разной дисперсности измельченного продукта при разных режимах классификации получены различные величины оценок детализирующего вейвлет-коэффициента 1 уровня. На рис. 5.19 показаны результаты вейвлет-анализа акустических сигналов рабочего режима измельчения газового угля (рис. 5.19 а) с параметрами, аналогичными рис. 5.18 а), и кварцевого песка (рис. 5.19 б) с параметрами классификации, аналогичными рис. 5.18 б).

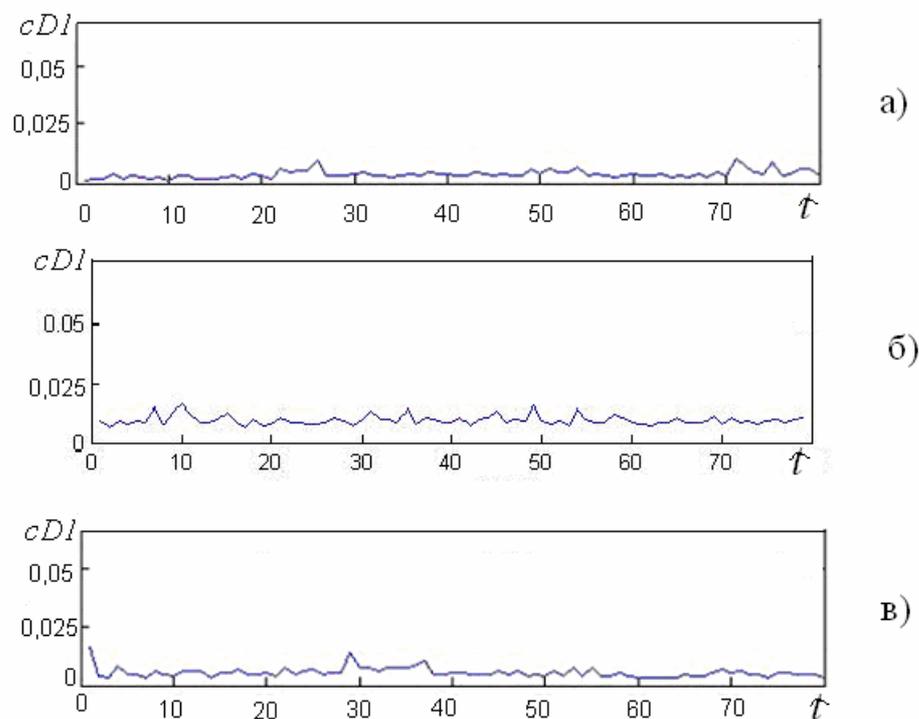


Рис. 5.18 – Стандартное отклонение детализирующего вейвлет-коэффициента 1 уровня для полупустой мельницы

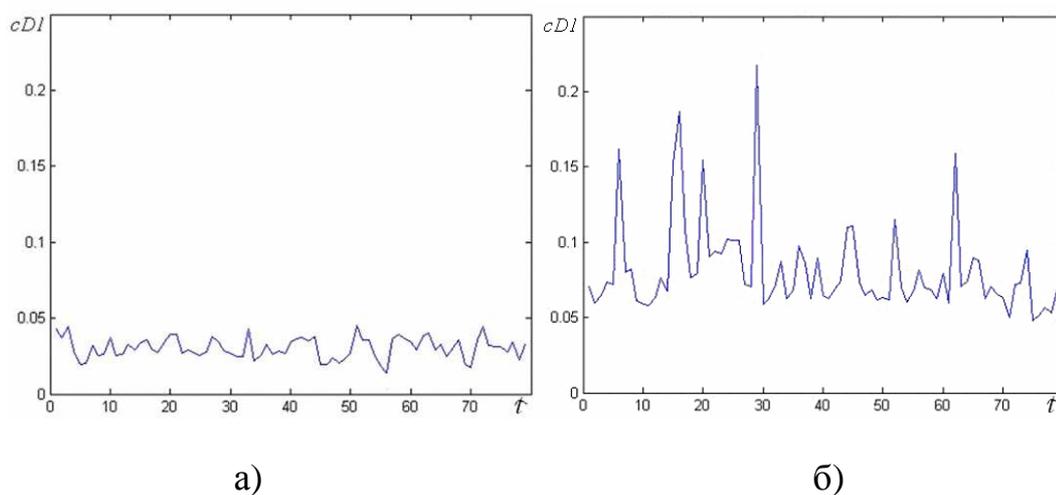


Рисунок 5.19 – Стандартное отклонение детализирующего вейвлет-коэффициента 1 уровня для рабочего режима мельницы

Значения детализирующего вейвлет-коэффициента 1 уровня для рабочего режима мельницы при измельчении материалов различных свойств от-

личаются в 2 - 4 раза. В частности, величина вейвлет-коэффициентов зависит от дисперсности получаемого продукта и свойств измельчаемого материала. Так, при измельчении кварцевого песка с разными режимами классификации и, соответственно, получении продуктов разной удельной поверхности (см. рис. 5.17 б и рис. 5.18 б) значения вейвлет-коэффициента отличаются в 1,5 раза. Для материалов разной плотности и исходной крупности (см. рис. 5.19) эти величины также отличаются на 50-100 %.

Таким образом, в результате исследования данных акустического мониторинга процесса струйного измельчения установлено:

- вейвлет-коэффициенты двух различных режимов (оптимальной и недостаточной загрузки струй материалом) различаются на порядок, поэтому они достаточно хорошо определяют степень заполнения мельницы;
- вейвлет-анализ сигналов струйной мельницы на стадии разгрузки при измельчении материалов различных физических свойств показал, что стандартные отклонения детализирующего вейвлет-коэффициента 1 уровня практически не отличаются, что позволяет разработать алгоритм управления загрузкой мельницы при струйном измельчении сыпучих материалов различной крупности;
- при оптимальном режиме измельчения существует зависимость вейвлет-коэффициентов от свойств измельчаемых материалов, что позволяет контролировать дисперсность получаемого продукта.

Для комплексного изучения акустических сигналов струйного измельчения и создания системы их анализа был проведен ряд исследований по поиску наиболее эффективных методов оценки АС. Дальнейшие исследования были направлены на контроль качества получаемого продукта. Анализ акустических сигналов показал отличие значений вейвлет - коэффициентов в 1,5 раза при получении кварцевого песка ВГМК различной дисперсности. Для материалов отличающихся плотностью и крупностью эти величины также различаются на 50-100 % [98].

Наряду с вейвлет-анализом сигналов зоны был применен метод, осно-

ванный на преобразовании Гильберта-Хуанга (ННТ) [98], который заключается в применении к исследуемому процессу эмпирической модовой декомпозиции, а затем Гильбертова спектрального анализа. Этот метод дает возможность проведения частотно-временного анализа данных.

Преобразование Гильберта действительной функции $x(t)$, $-\infty < t < \infty$ есть действительная функция определенная в виде:

$$\tilde{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{1-\tau} d\tau . \quad (5.9)$$

Данное преобразование изменяет фазу всех частотных составляющих сигнала $x(t)$ на $\pi/2$. Это делает сигнал $x(t)$ ортогональным $\tilde{x}(t)$, что позволяет сформировать из сигналов комплексный аналитический сигнал $z(t)$

$$z(t) = x(t) + j\tilde{x}(t) . \quad (5.10)$$

Для определения текущих временных параметров акустических сигналов необходимо разложить их на несколько моногармонических составляющих, удовлетворяющих условию симметричности. Эта задача решена методом Н. Хуанга, который еще называется методом «эмпирической модовой декомпозиции сигналов» и представляет собой адаптивную итерационную вычислительную процедуру разложения исходного сигнала на эмпирические моды.

Установлены зависимости вейвлет-коэффициентов и показателей преобразования Гильберта-Хуанга (ННТ) от вида, плотности и дисперсности материала. Анализ акустических сигналов измельчения цирконового концентрата на промышленной мельнице ВГМК показал, что все показатели Гильберта-Хуанга и вейвлет-преобразований уменьшаются при увеличении удельной поверхности продукта измельчения (см. табл. 5.3 и 5.4). Показатель плотности мощности спектра Гильберта по сравнению с другими показателями максимально коррелирует с различием удельной поверхности материала.

ла в рабочем режиме.

Таблица 5.3

Показатели Гильберта-Хуанга для АС струйной мельницы ВГМК

S_{y0} , см ² /Г	Амплитуда огibaющей	Плотность мощно- сти спектра Гильберта	Стандартное отклонение амплитуды
1600	0,000063	0,000005	0,000065
2017	0,001159	0,000003	0,001322
2040	0,003061	0,000016	0,003355
2570	0,003566	0,000028	0,004019

Таблица 5.4

Вейвлет коэффициенты для АС струйной мельницы ВГМК

S_{y0} , см ² /Г	cD1	cD2	cD3
1600	0,000181	0,000175	0,000173
2017	0,011457	0,013505	0,008993
2040	0,013351	0,014075	0,012574
2570	0,033723	0,015545	0,014982

Таким образом, предложенная система анализа акустических сигналов процесса струйного измельчения, которая основана на использовании акустических показателей и применении преобразования Гильберта-Хуанга и вейвлет - анализа, позволяет контролировать режим работы струйной мельницы и дисперсность получаемого продукта на базе результатов акустического мониторинга процесса.

Выводы

1) Использование результатов акустического мониторинга процесса струйного измельчения позволило определить информативные частоты сигналов. По амплитудам сигналов с информационными частотами можно судить о режиме измельчения и заполненности мельницы материалом.

2) Вейвлет-анализ сигналов струйной мельницы на стадии разгрузки при измельчении различных материалов (уголь, циркон, шлак) показал, что стандартные отклонения детализирующего вейвлет - коэффициента первого уровня практически не отличаются. С другой стороны, установлено, что вейвлет-коэффициенты акустических сигналов двух различных режимов (рабочий, разгрузка) различаются на порядок. Таким образом, выбранный метод пригоден для установления оптимального режима загрузки струи материалом с позиций производительности мельницы, что позволяет дополнить информацией алгоритм управления загрузкой мельницы при струйном измельчении сыпучих материалов различной крупности.

3) Применение преобразования Гильберта-Хуанга позволяет контролировать дисперсность получаемого продукта на базе результатов акустического мониторинга процесса.

4) Впервые разработаны методы визуализации и идентификации процесса измельчения на основе использования информационных технологий для анализа акустоэмиссионных сигналов зоны измельчения и классификации, позволяющие контролировать режимы работы мельницы и выбирать оптимальную ее загрузку. Прогнозирование хода процесса измельчения с использованием моделирования и ИТ позволит снизить инерционность управления и осуществлять упреждающие управляющие воздействия для обеспечения эффективности производства тонкодисперсных порошков.

6 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

6.1 Анализ результатов промышленного акустического мониторинга

Важной научной задачей является устранение противоречий между необходимостью увеличения производительности оборудования для высококачественного тонкого измельчения и требованиями ресурсосбережения энергетических и материальных затрат при производстве соответствующего продукта. Проведенные исследования применения системы акустического мониторинга работы лабораторной и промышленной струйных мельниц показали связь технологических и акустических параметров процесса. На этой основе разрабатывается система оптимизации работы струйных мельниц с целью повышения эффективности их работы.

Акустическую активность исследуемых зон противоточной струйной установки промышленного типоразмера производительностью до 1 т/ч измеряли с помощью описанной выше аппаратной системы акустического мониторинга (см. рис. 4.6).

На рис. 6.1 показана установка акустической аппаратуры на промышленной струйной мельнице, работающей в условиях Вольногорского горно-металлургического комбината (ВГМК) при использовании в качестве энергоносителя сжатого воздуха давлением $P \leq 0,6$ МПа..

Измельчению подвергался цирконовый концентрат исходной крупностью менее 0,16 мм. Кинетика акустической активности \dot{N} и амплитудного распределения акустических сигналов в рабочем режиме устанавливалась при различных значениях давления энергоносителя: в диапазоне от 0,3 до 0,6 МПа. Акустический мониторинг процесса струйного измельчения на промышленной установке проводился при двух режимах классификации, определенных техническими требованиями производства.

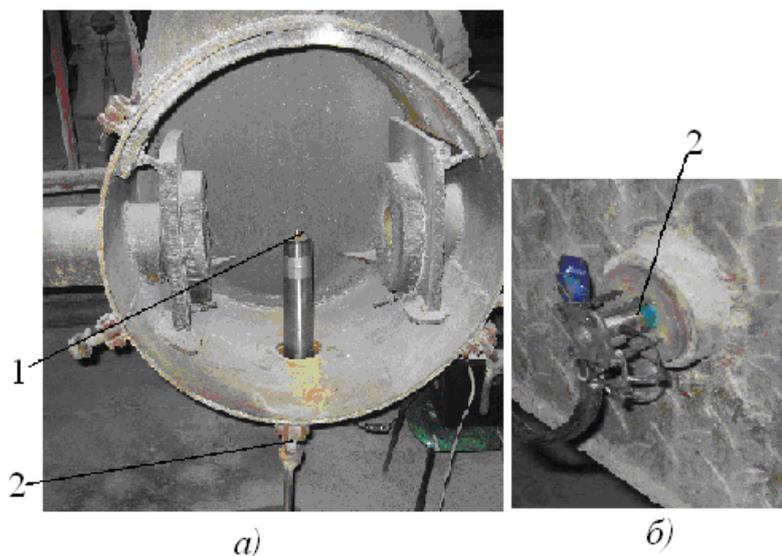


Рисунок 6.1 – Установка системы акустического мониторинга на промышленной мельнице УСИ-100: а) - в помольной камере; б) - на выходе классификатора; 1 – волновод, 2 – датчик.

Частота n вращения оборотов классификатора задавалась в достаточно узком диапазоне $n = 80 - 180 \text{ мин}^{-1}$, что исключало брак готового продукта. По результатам ситового анализа (остатком на сите соответствующего размера) величина этого параметра n корректировалась для соблюдения требования качества готового продукта.

Для измерения счета и значений амплитуд акустических сигналов волновод был установлен в центре помольной камеры промышленной мельницы. В ходе опробования акустического мониторинга было измельчено порядка двух тонн материала в течение 2,1 часа.

На рис. 6.2 показан значительный износ волновода (1) ($\approx 2 \text{ см}$). В дальнейшем во избежание интенсивного износа волновод размещали на некотором удалении от центра зоны измельчения: конец волновода располагался на уровне нижнего края струи материала, выходящего из разгонной трубки (рис.6.3 а) и по середине расстояния от центра области измельчения до края разгонной трубки (рис. 6.3 б).

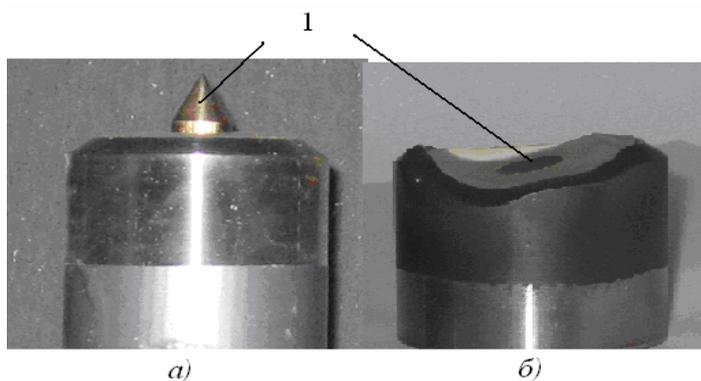


Рисунок 6.2 – Общий вид волновода (1) до измельчения (а) и после обработки 2т материала (б).

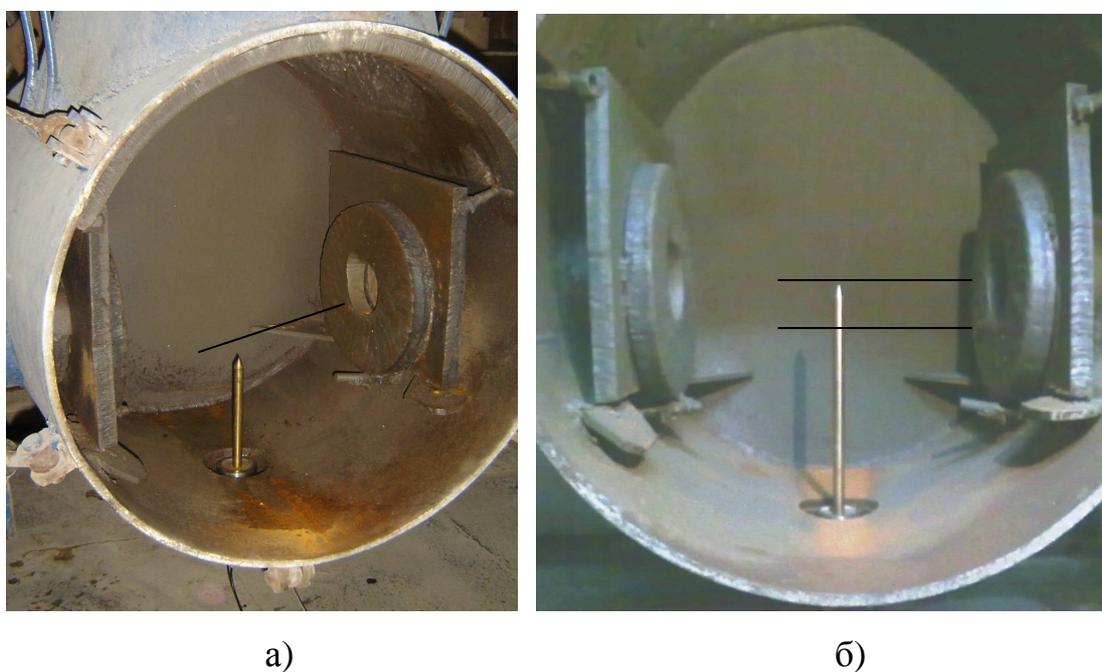


Рисунок 6.3 – Изменение положений волновода

Акустическую активность промышленной струйной мельницы измеряли с помощью широкополосных пьезокерамических датчиков, соединенных с латунными волноводами, установленными внутри двух зон (помольной камеры и классификатора на выходе из него газозвеси). Запись сигналов и дальнейшая обработка осуществлялась посредством аналого-цифрового преобразователя (АЦП), соединенного с персональным компьютером.

6.2 Исследование акустических характеристик промышленной струйной мельницы

В ходе исследований был реализован поиск рационального местоположения волновода в помольной камере для получения максимально возможной акустической информации для анализа режима струйного измельчения. Анализ акустической информации проводился с использованием лабораторных и промышленных опытных данных по измельчению различных твердых материалов [99].

Методика регистрации опытных данных акустического мониторинга зоны измельчения состояла в следующем. На различных стадиях заполнения помольной камеры материалом измерялось общее число \dot{N}_Σ АС различных амплитуд. Для анализа из общего счета N_Σ АС исключалось число АС, характеризующих фоновый шум струи энергоносителя. При оценке амплитуд устанавливалась максимальная A_{\max} АС, т.е. амплитуда сигналов с долевым участием более 1%. Число этих сигналов обозначалось, как \dot{N}_{\max} . Производительность мельницы вычислялась по методике предприятия, величина удельной поверхности $S_{\text{уд}}$ полученного продукта определялась на аппаратах Malvern и Товарова Т-3

В процессе промышленной проверки акустического метода оптимизации струйного измельчения исследовались режимы измельчения и акустической активности мельницы на различных стадиях загрузки струй материалом: в начальные моменты (первые минуты измельчения), в рабочем режиме (десятки минут) и при разгрузке струй. Изучалось влияние давления энергоносителя (в диапазоне $P = 0,6-0,3$ МПа) и частоты вращения ротора классификатора ($n=107-177$ мин⁻¹), изменяющей дисперсность готового продукта, на акустические параметры в исследуемых зонах. Загрузка мельницы материалом проводилась непрерывно, однако ее уровень регулировался в ходе эксперимента. Условия и результаты испытаний приведены в таблице 1.

Таблица 6.1 - Условия и результаты опробования акустического мониторинга при струйном измельчении циркона в мельнице №7 ВГМК

P , Мпа	n , мин ⁻¹	G , кг/ч	$S_{уд}$, см ² /Г	$\dot{N}_{\Sigma} * 10^{-5}$, с ⁻¹	$K_{онт}$, В/с	$K_{эфф} =$ $G / \lg \dot{N}_{\Sigma}$	Режим
Позиция волновода 1							
0,6	84	960	708	0,67	32,0	55,26	2
0,6	84	1020	1515	0,87	16,5	57,36	1
0,6	84	1100	1430	0,9	31,5	61,68	1
0,61	180	600	2376	0,92	31,5	33,58	1
Позиция волновода 2							
0,52	177	528	2501	1,9	10,5	25,81	1
0,52	177	624	2605	1,7	61	23,11	1
0,52	177	354	2451	1,86	19,2	46,42	4
0,52	107	1044	1970	1,34	67,4	25,81	1
0,52	107	1062	2021	1,8	11,0	23,11	1
0,52	107	1272	1609	1,7	139,4	46,42	2
0,52	107	1062	2054	1,7	117,6	25,81	2
0,52	107	954	1987	1,5	132,8	23,11	2
0,3	107	336	1852	1,4	15,9	46,42	3
0,4	107	1224	2021	1,66	7,6	25,81	3
0,52	107	738	1550	1,68	50	23,11	4
Позиция волновода 3							
0,52	177	486	2570	1,7	19,8	25,81	2
0,52	177	432	2427	1,56	11,3	23,11	2
0,53	107	860	1756	1,4	6,3	46,42	1

Режимы: 1 – рабочий; 2 – перегрузка материалом;

3 – перегрузка давлением; 4 – разгрузка

Рассматривались три положения волновода относительно центра помольной камеры: 1 – *центральное* (в центре рабочей зоны), 2 – *нижнее* (на уровне нижнего края разгонных трубок), 3 – *среднее* положение между 1 и 2.

На рис. 6.4 показаны характерные записи АС в зависимости от положения конца волновода в помольной камере.

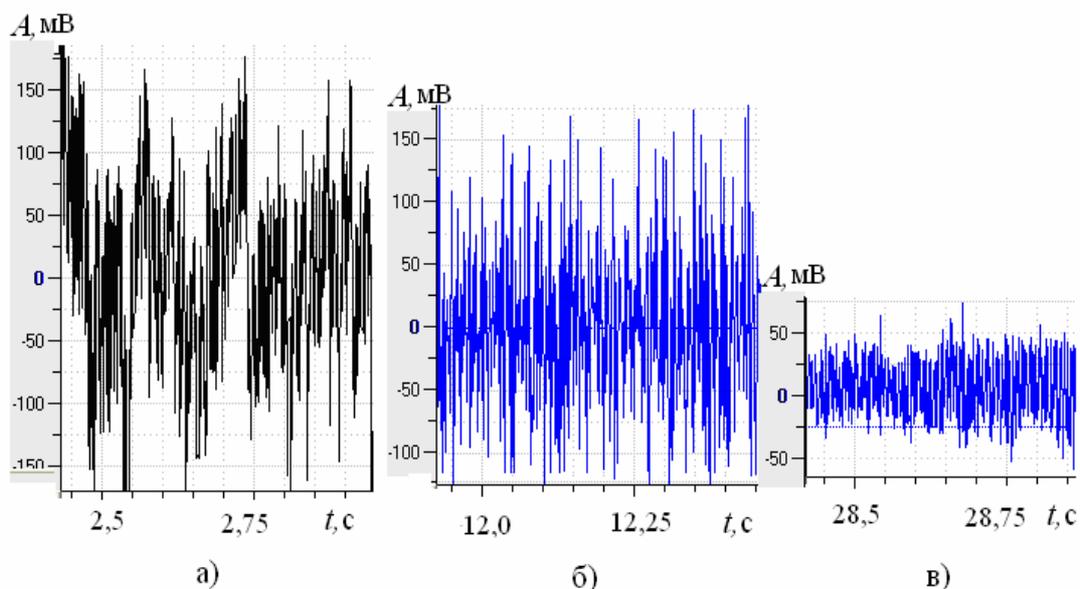


Рисунок 6.4 – Записи акустических сигналов в различных положениях волновода: а) – центральное; б) - среднее; в) – нижнее.

Исследования показали, что акустические параметры \dot{N}_{max} , \dot{N}_{Σ} , A_{max} зоны помола изменяются под влиянием степени загрузки струй материалом (перегрузка, недогрузка, рабочий режим), частоты вращения ротора классификатора и давления энергоносителя.

6.3 Обоснование критериев оптимизации

Обработка результатов акустического мониторинга работы струйной мельницы позволила установить следующие параметры и зависимости:

- кинетику акустической активности \dot{N} и амплитуд максимальных значений (A_{max}) акустических сигналов в рабочем режиме измельчения;
- амплитудное распределение акустических сигналов на стадии разгрузки струй в зависимости от режима классификации;
- амплитудное распределение акустических сигналов в рабочем режиме при различных значениях давления энергоносителя;
- кинетику амплитуд сигналов в различных режимах измельчения: загрузка, рабочий режим и разгрузка струй.

По итогам мониторинга вычислялись следующие акустические коэффициенты и критерии:

- критерий эффективности процесса измельчения $K_{эфф} = G / \lg \dot{N}_\Sigma$, (G , г/с, \dot{N}_Σ , имп/с);

- критерий эффективности диспергирования продукта $K_s = G \cdot S_{yd} / \dot{N}_\Sigma$, ($\text{см}^2/\text{имп}$);

- акустический показатель энергоёмкости измельчения $\mathcal{E}_N^{изм} = \dot{N}_\Sigma / G$ (имп/г);

- акустический показатель $\mathcal{E}_N^{дисп} = \dot{N}_\Sigma / G / S_{yd}$ энергоёмкости диспергирования (имп/см²);

- акустический критерий оптимальности процесса измельчения, равный произведению максимальной амплитуды A_{max} (В) (на уровне и больше 20мВ) на акустическую активность \dot{N}_{max} (с⁻¹) с максимальной амплитудой сигналов: $K_{opt} = A_{max} \dot{N}_{max}$ (В/с).

На рис. 6.5 показаны графики зависимостей $K_{эфф}(G) = G / \lg N$ для лабораторной (а) и промышленной (б) мельницы. Установлено, что величина критерия $K_{эфф}$ изменяется аналогично в условиях работы как лабораторной, так и промышленной мельницы при струйном измельчении различных материалов.

Зависимость $K_{эфф} = f(G)$ для лабораторной мельницы УСИ-20 имеет степенной характер, выраженный уравнением $K_{эфф} = 0,2G^{0,96}$ с достоверностью аппроксимации $R^2 = 0,94$. Если анализировать экспериментальные данные по измельчению циркона, то уравнение имеет вид: $K_{эфф} = 0,29G^{0,89}$ ($R^2 = 0,98$). Исследование работы промышленной мельницы показало аналогичный степенной характер зависимости $K_{эфф} = f(G)$, выражаемый уравнением $K_{эфф} = 0,2G^{0,99}$ (с достоверностью аппроксимации $R^2 = 0,9997$). Установленную связь коэффициента эффективности и производительности мельницы можно характеризовать линейной зависимостью $K_{эфф} = 0,2G + 0,38$ с меньшим коэффициентом достоверности $R^2 = 0,9993$.

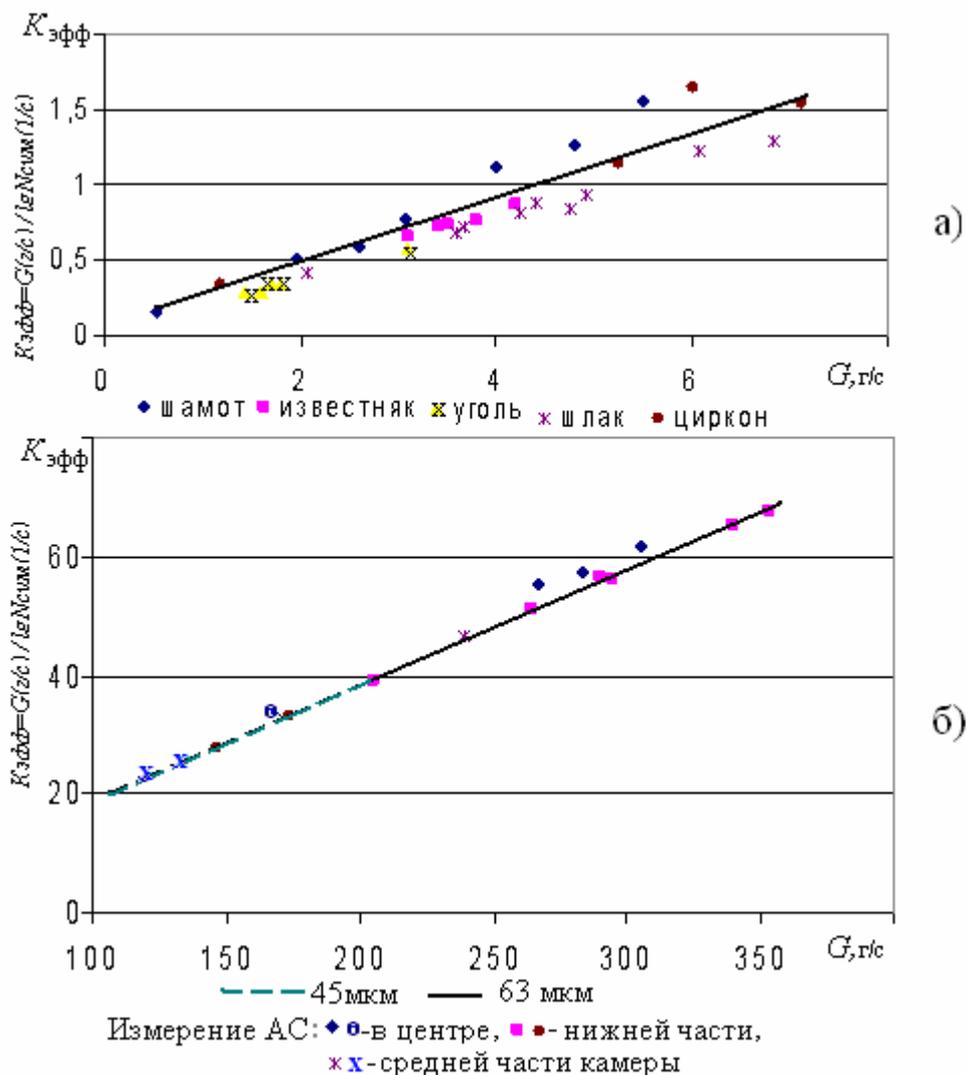


Рисунок 6.5 – Зависимости $K_{эфф}$ от производительности лабораторной (а) и промышленной (б) мельницы: $G_{УСИ-20} = 2-25$ кг/ч, $G_{пром} = 300 - 1300$ кг/ч

Вышеизложенное позволяет утверждать о существовании закономерной достоверной зависимости $K_{эфф}(G)$ от производительности струйных мельниц различного типоразмера при переработке твердых сыпучих материалов. Эту зависимость можно использовать при внедрении систем оптимизации процесса.

На рис. 6.6 представлена зависимость $K_{опт}(G)$, установленная при измельчении циркона в промышленной мельнице. Видно, что величина критерия оптимальности зависит от производительности мельницы, но имеет меньший уровень при более высокой дисперсности измельченного продукта:

при $d = 45$ мкм $K_{онм} = 20 - 60$ В/с; при $d = 63$ мкм $K_{онм} = - 120$ В/с.

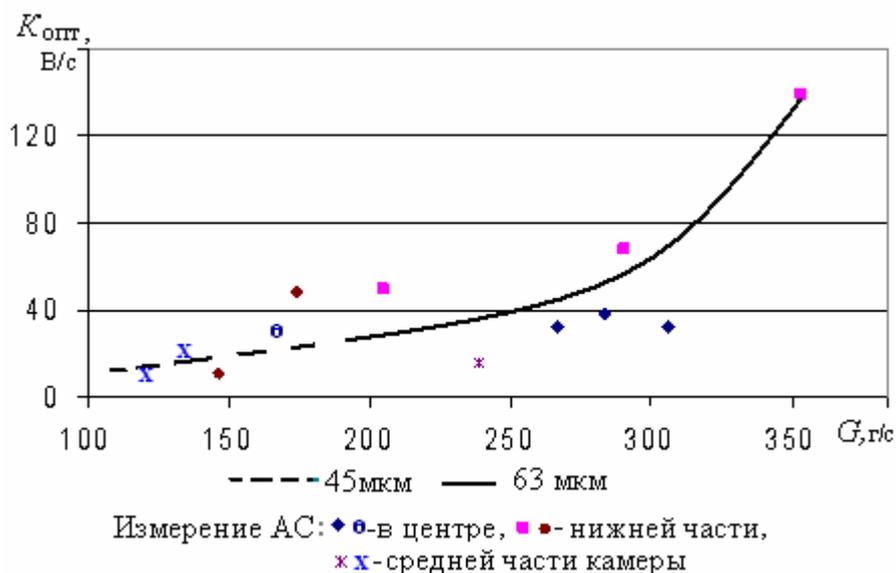


Рис. 6.6 Зависимость $K_{онм}$ от производительности мельницы ВГМК.

Общая зависимость $K_{онм}(G)$ при всех положениях волновода носит полиномиальный характер (второй степени) вида $K_{онм} = 0,0033G^2 - 1,03G + 89,57$ с коэффициентом достоверности $R^2 = 0,96$. Эта зависимость может быть использована для прогнозной оценки критерия оптимальности в пределах изменения производительности струйной мельницы G 300 – 1300 кг/ч.

Исследования показали целесообразность наблюдения акустического излучения при установке волновода в центре рабочей зоны (положение 1). Следует отметить, что оптимальным условиям измельчения соответствуют следующие значения технологических показателей: при крупности продукта 63 мкм $G = 960 - 1270$ кг/ч, $S_{y\partial} = 1500 - 2000$ см²/г, при крупности продукта 45 мкм $G = 530 - 620$ кг/ч, $S_{y\partial} = 2400 - 2600$ см²/г. При этом наблюдаются оптимальные значения предложенных акустических показателей и параметров для оценки эффективности струйного измельчения: при крупности продукта 63 мкм $K_{онм} = 60 - 130$ В/с, $K_{эфф} = (25 - 60)$, $\mathcal{E}_{изм} = 480 - 580$ имп/г; при крупности продукта 45 мкм $K_{онм} = 10 - 60$ В/с, $K_{эфф} = (23 - 46)$, $\mathcal{E}_{изм} = 980 - 1300$ имп/г.

В процессе промышленного опробования системы оптимизации при

измельчении циркона были установлены минимальные значения энергоемкости диспергирования порядка $\mathcal{E}_{дисп} = 0,3 - 0,5$ имп/см².

6.4 Разработка способов акустической оптимизации измельчения и классификации

Промышленное опробование показало, что характеристики акустического излучения потока газозвеси в воздуховоде после классификатора изменяются в зависимости от режима классификации, т.е. от размера частиц измельченного продукта (см. рис. 6.8). При этом импульсы изменяющейся амплитуды характеризуют момент вариации гранулометрического состава продукта в ходе измельчения.

На рис. 6.8 иллюстрируется момент (а) появления частиц большего размера в результате крутого изменения амплитуд акустических сигналов на выходе из классификатора. Отбор проб измельченного продукта подтвердил факт его укрупнения, что потребовало повышения частоты вращения ротора классификатора с 88 до 107 мин⁻¹.

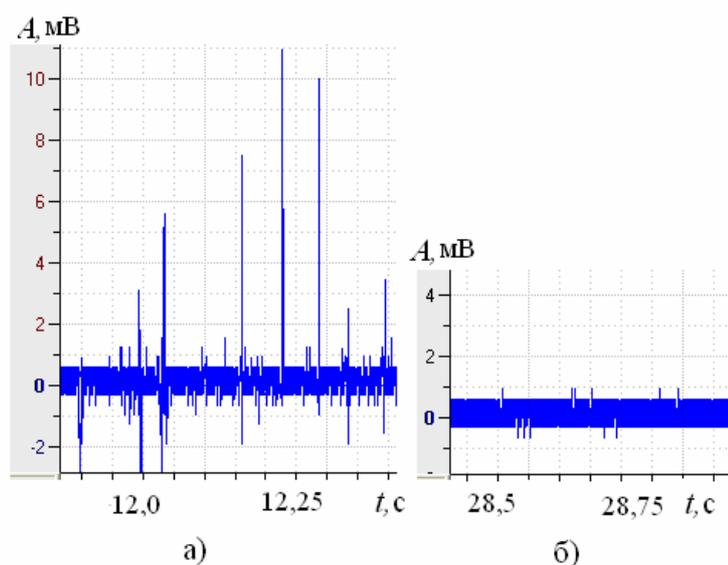


Рисунок 6.8 – Акустические сигналы за классификатором:

- а) наличие отклонений размеров частиц от нормы;
- б) кондиционное качество продукта.

Таким образом, исследования показали перспективность применения акустического мониторинга для задачи оптимизации процесса измельчения. Для контроля качества продукта необходимо контролировать АС в зоне за классификатором и при отклонении величины амплитуды от заданной, уточнять режим классификации. Система оптимизации работы струйной мельницы должна быть основана на непрерывном мониторинге акустических параметров: \dot{N}_{max} , \dot{N}_{Σ} , A_{max} за выбранный интервал (порядка 0,1-1 с) наблюдений. На основе этих параметров вычисляются акустические критерии оптимальности K_{opt} , эффективности $K_{эфф}$ и энергоемкости диспергирования $\mathcal{E}_{дисп}$ и измельчения $\mathcal{E}_{изм}$.

В ходе измельчения на основе анализа указанных критериев следует обеспечить регулирование загрузки струй и частоты вращения ротора классификатора с ориентацией на достижение их оптимальных значений, обеспечивающих ведение процесса с максимальной производительностью и минимальной энергоемкостью [5,6].

Аналогичные исследования акустической активности зоны измельчения цирконового концентрата проводились на лабораторной мельнице УСИ-20. В таблице 6.2 сопоставлены активности сигналов при измельчении циркона на УСИ-20 и в промышленной мельнице УСИ-100.

Таблица 6.2

Типоразмер	P , МПа	n , мин ⁻¹	Q , г/с	q , г/с	$S_{уд}$, м ² /г	$\dot{N} \cdot 10^5$
УСИ 20	0.3	600	7.11	2.26	2163	0.83
УСИ-20	0.3	2000	4.1	1.3	5518	0.91
ПСМ	0.6	84	277.78	4.37	1515	0.9
ПСМ	0.6	180	167.7	2.64	2376	0.92

При постоянном давлении энергоносителя P для различных режимов классификации n определяли производительность мельниц Q и рассчитывали

удельную производительность $q = Q/S_{сеч}$ ($S_{сеч}$ – площадь разгонной трубки). Результаты расчетов приведены в таблице 6.3

Значения \dot{N} для обоих типоразмеров мельниц близки по порядку величины. Расчетные величины удельной производительности мельниц на единицу площади сечения струи составили: для УСИ 20 $q_{уд} = 1,3 - 2,26 \frac{\text{г}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$ (площадь сечения струи $S = 0,8 \text{ см}^2$), для промышленной – $q_{уд} = 2,64 - 4,37 \frac{\text{г}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$ ($S = 60 \text{ см}^2$). Различие этих величин можно объяснить положительным влиянием более высокого начального давления энергоносителя ($P = 0,6 \text{ МПа}$) на скорость струи, что способствовало росту удельной производительности промышленной мельницы. Лабораторные испытания были проведены при $P = 0,3 \text{ МПа}$.

На всех стадиях загрузки струй материалом регистрировали уровень акустической активности \dot{N} и значения амплитуд средних $A_{ср}$ и максимальных A_{max} . Загрузка струй исходным материалом проводилась непрерывно. Условия и результаты испытаний приведены в таблице 6.3.

При $n = 84 - 86 \text{ мин}^{-1}$ крупность продукта контролировали остатком R_{60} на контрольном сите 60 мкм, при $n = 180 - 200 \text{ мин}^{-1}$ – остатком R_{40} на сите размером обхвата 40 мкм. Из таблицы видно, что в режиме работы мельницы с рациональной загрузкой измельчаемого материала (коэффициент загрузки $K = 0,5 - 1$) активность акустического излучения зоны помола промышленной мельницы составляет $\dot{N} = (0,9 - 0,96) \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$, производительность $Q = 1,02 - 1,1 \text{ т/ч}$ ($P = 0,6 \text{ МПа}$, $n = 84 \text{ мин}^{-1}$).

Условия и результаты проведения акустического мониторинга
промышленной струйной установки ВГМК

№ опыта	t , мин	n , мин ⁻¹	P , МПа	$S_{уд}$, см ² /г	Q , кг/ч	R_{60} , R_{40} , %	K загр	A_{max} , мВ	A_{cp} , мВ	$\dot{N} * 10^5$, с ⁻¹	Режимы
1	0	86	0,6	708				40	35	1,3	Загрузка
2	28	84	0,6		960		>1	200	65	0,67	Перегрузка
3	45	84	0,6	1515		2,3	1	190	75	0,96	Рабочий
4	69	84	0,6		1020		0,5	165	90	0,87	Рабочий
5	85	84	0,6		1100	2,0	0,5	185	100	0,9	Рабочий
6			0,6	1430		3,2	<0,5	155	80	0,85	Недогрузка
7	95	84	0,5 0,4 0,3				1	130 50 10	70 20 5	0,94 0,92 0,9	Изменение P
8	102	180	0,6	2376	600	1,0	1	180	105	0,92	Рабочий
9	130	200	0,6			0,8	<0,5	170	97	0,82	Недогрузка
10	131		0,5 0,4 0,3				1	120 40 10	65 10 5	0,9 0,85 0,73	Изменение P

6.5 Повышение эффективности измельчения в результате акустической оптимизации процесса

Практика струйного измельчения редкометалльных концентратов циркона и дистена показала, что важным фактором, определяющим производительность мельницы, является неоднозначное состояние загрузки струй материалом. При прочих равных условиях масса материала в струе может быть достаточной или недостаточной для достижения требуемой скорости и эффективного разрушения частиц в зоне помола. В зависимости от состояния

загрузки струй режим измельчения называют рабочим, разгрузочным или перегрузкой. Последний не допустим, т.к. нарушается режим пневмотранспортирования материала в системе мельницы.

В этой связи в процессе анализа работы промышленной струйной мельницы изучалась взаимосвязь производительности и дисперсности продукта в различных режимах загрузки струй. На рис. 1 показаны зависимости производительности G мельницы ($P = 0,6$ МПа) от дисперсности S_{y0} измельченного циркона в рабочем режиме, при разгрузке струй и работе с максимальной производительностью.

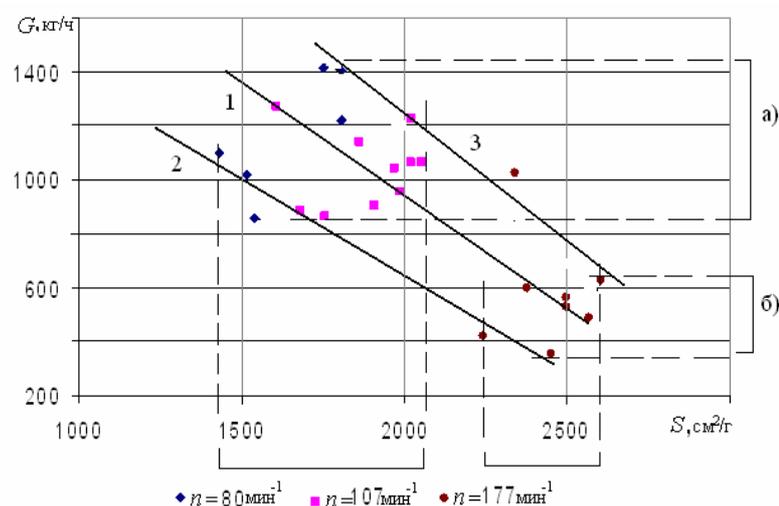


Рисунок 6.9 – Изменение производительности G струйной мельницы в различных диапазонах дисперсности S_{y0} измельченного циркона и режимах загрузки струй: рабочий режим (1), режим разгрузки струй (2), режим (3) максимальной производительности

Графики показывают, что с ростом дисперсности продукта величина G закономерно уменьшается, в частности, с повышением S_{y0} от 1500 до 2600 $\text{см}^2/\text{г}$ производительность G уменьшается от 1400 до 400 $\text{кг}/\text{ч}$. Можно отметить, что степень изменения производительности мельницы при переходе на более высокую дисперсность кондиционного продукта ($R_{63} \leq 3\%$) зависит от уровня S_{y0} .

Зависимости $G(S_{y0})$, показанные на рис. 6.9, позволяют заключить,

что график 1 характеризует оптимальные состояния струй в режимах максимальной производительности мельницы при кондиционной дисперсности измельченного циркона.

На рис. 6.9 пунктиром обозначены интервалы изменения удельной поверхности порошков при близких уровнях производительности, с одной стороны, и интервалы изменения производительности при равнозначной дисперсности продуктов, с другой стороны. Видно, что в диапазоне повышенной дисперсности ($S_{y0}=2500-2600\text{см}^2/\text{г}$) изменение производительности ($G = 600-350$ кг/ч) не так велико, как при получении грубодисперсных порошков ($G = 1400 - 800$ кг/ч при $S_{y0} = 1700 - 1800$ см²/г).

Это означает, что в низкочастотных режимах классификации ($n = 80-100$ мин⁻¹) из-за малой кратности циркуляции материала в системе мельницы нельзя допускать чрезмерную разгрузку струй, из-за которой снижается производительность и вероятны повышенные удельные энергозатраты.

Во избежание избыточных энергозатрат в технологическом процессе струйного измельчения ($R_{63} \leq 3\%$) целесообразно применить акустический мониторинг, во-первых, дисперсности (S_{y0}) измельченного продукта, и, во-вторых, режима загрузки струй твердой фазой (разгрузка, недогрузка, перегрузка). Мониторинг второго фактора позволит своевременно предотвратить перемещение графика 3 в ситуации графиков 1 или 2 (см. рис. 6.9).

Исследования показали, что на различных стадиях технологии струйного измельчения, включая подачу в струю материала, изменение содержания в струях твердой фазы, размера частиц, происходят изменения счета акустических сигналов и распределений по величине их амплитуд. Применение акустического мониторинга зоны помола позволяет устанавливать суммарную активность \dot{N}_{Σ} сигналов в зоне помола и частный счет $\dot{N}_{мин}$ сигналов с условно минимальными ($A_{мин} \cong 2 - 5$ мВ) значениями амплитуды. За условно минимальную амплитуду $A_{мин}$ принимали величину, превышающую амплитуду сигналов шума струи энергоносителя без подачи твердой фазы («холостой струи»). Для исследуемых зон струйной мельницы эта величина изме-

няется от $A_{мин} \cong 2$ мВ на выходе классификатора до $A_{мин} \cong 5$ мВ – в помольной камере. На рис. 6.10 показаны записи акустических сигналов исследуемых зон при различных режимах классификации и, соответственно, при различной дисперсности продукта.

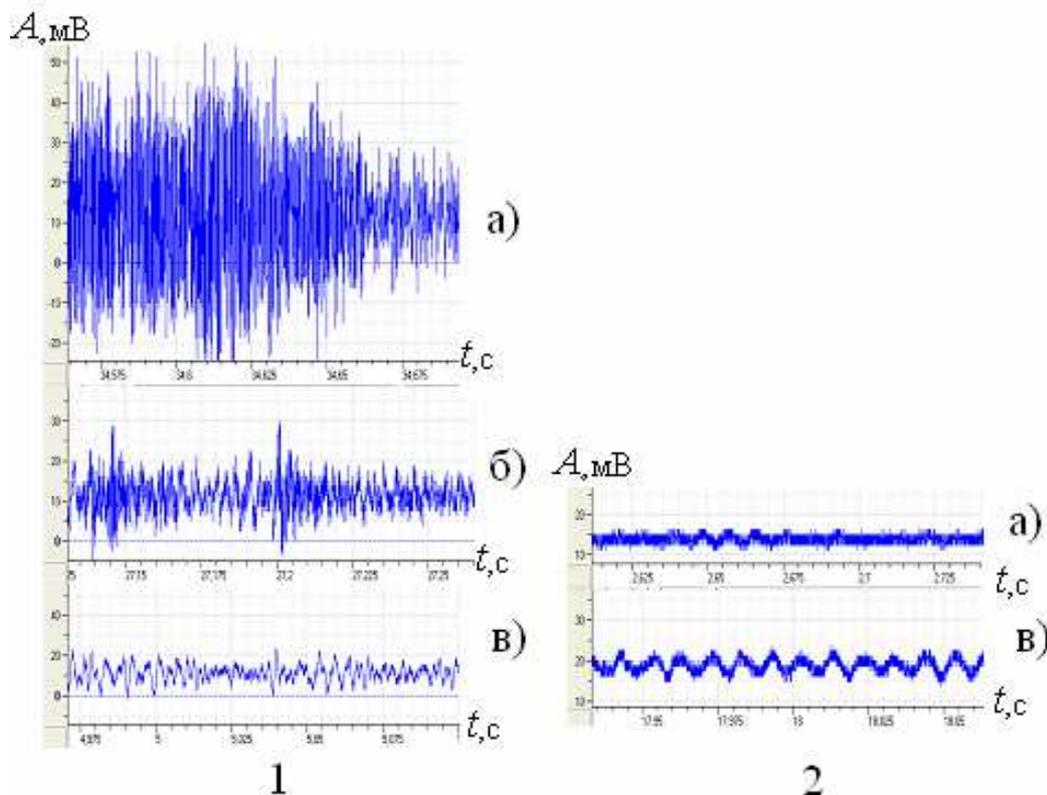


Рисунок 6.10 – Записи акустических сигналов зон измельчения (1) и транспортирования (2) продукта в различных режимах работы классификатора: а) $n = 80 \text{ мин}^{-1}$, б) $n = 107 \text{ мин}^{-1}$, в) $n = 170 \text{ мин}^{-1}$.

Для оценки акустической энергоёмкости измельчения выведены коэффициенты $\mathcal{E}_{изм}$ (имп/г) и $\mathcal{E}_{дисп}$ (имп/см²), значительно отличающиеся для оптимального и неоптимального режима измельчения:

- 1) акустический показатель энергоёмкости измельчения $\mathcal{E}_{изм} = \dot{N}_{\Sigma} / G$;
- 2) акустический показатель энергоёмкости диспергирования $\mathcal{E}_{дисп} = \dot{N}_{\Sigma} / G / S_{y\partial}$, имп/см².

На рис. 6.11 – 6.13 иллюстрируются тенденции снижения удельных акустических энергозатрат $\mathcal{E}_{изм}$ (имп/г) и $\mathcal{E}_{дисп}$ (имп/см²) с повышением произво-

дительности мельницы.

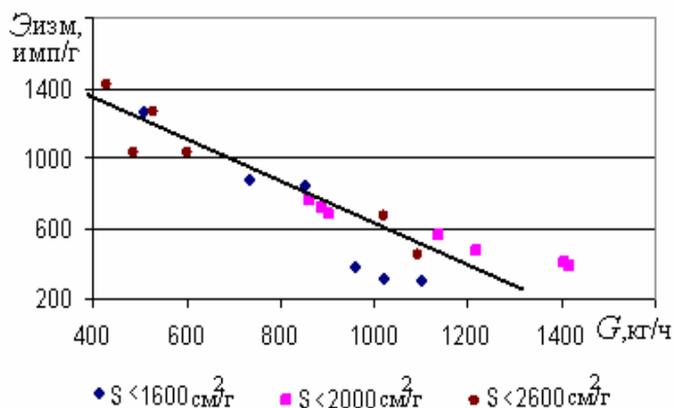


Рисунок 6.11 – Зависимости акустической энергоемкости измельчения от производительности мельницы при изменении дисперсности продукта в различных диапазонах.

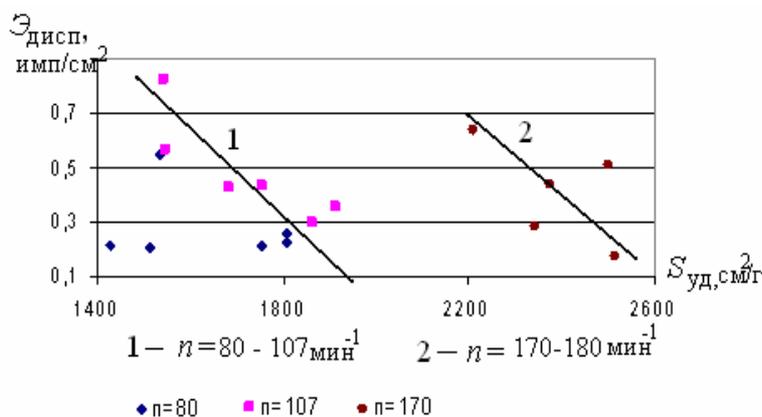


Рис. 6.12 – Зависимости акустической энергоемкости диспергирования от уровня дисперсности продукта в различных диапазонах частоты вращения классификатора.

В таблице представлены результаты анализа технологических и энергетических показателей тонкого измельчения циркона (-45мкм). Их значения в оптимальном и неоптимальном режиме отличаются значительно:

$\mathcal{E}_{изм}^{opt} = 669 - 450$ (имп/г), $\mathcal{E}_{изм}^{неopt} = 1416 - 1830$ (имп/г); аналогично $E_{уд}^{opt} = 278$ кВт-ч/т; $E_{уд}^{неopt} = 805$ кВт-ч/т.

Показатели оценки акустической ($\mathcal{E}_{изм}$, $\mathcal{E}_{дисп}$) и технологической ($E_{уд}$, E_s) энергоёмкости измельчения и диспергирования циркона в различных режимах работы классификатора промышленной мельницы.

G , кг/ч	$S_{уд}$, см ² /г	$\mathcal{E}_{изм}$, имп/г	$\mathcal{E}_{дисп}$, имп/см ²	$E_{уд}$, кВт-ч/т	E_s , кВт-ч/ м ²
Оптимальный режим, $n= 170 -180 \text{ мин}^{-1}$					
1094,4	2513	450,668	0,17933	260,417	0,00104
1022,4	2342	669,0141	0,28566	278,756	0,00119
624	2605	1038,462	0,39864	456,731	0,00175
Неоптимальный режим, $n= 170-180 \text{ мин}^{-1}$					
432	2209	1416,667	0,641316	659,7222	0,00298
354	2451	1830,508	0,746841	805,0847	0,00328

Приводя к реальным энергозатратам (мощность привода компрессора составляет $N = 285$ кВт, производительность $G_{опт} = 1,02$ т/ч, $G_{неопт} = 0,43$ т/ч), получим расчетную среднюю величину экономии удельных энергозатрат $\Delta E_{уд} = 659,7 - 278,7 = 381$ кВт-ч/т при получении порошка с удельной поверхностью $S_{уд} = 2200 - 2300$ см²/г .

На рис. 6.13 показана кинетика удельных показателей энергозатрат в технологической ($E_{уд}$, E_s) и акустической ($\mathcal{E}_{изм}$, $\mathcal{E}_{дисп}$) оценке эффектов измельчения и диспергирования при различной производительности промышленной струйной мельницы и получении продуктов различной дисперсности.

Графики иллюстрируют текущие колебания технологических и энергетических показателей мельницы в результате работы с недогрузкой материалом струй или избыточной их разгрузкой, а также в режимах классификации с повышенной величиной ($n > 107$ мин⁻¹). Анализ показывает возможность снижения удельных величин технологических энергозатрат в 2-2,5 раза с использованием опытных данных акустического мониторинга и расчетных значений $\mathcal{E}_{изм}$ и $\mathcal{E}_{дисп}$.

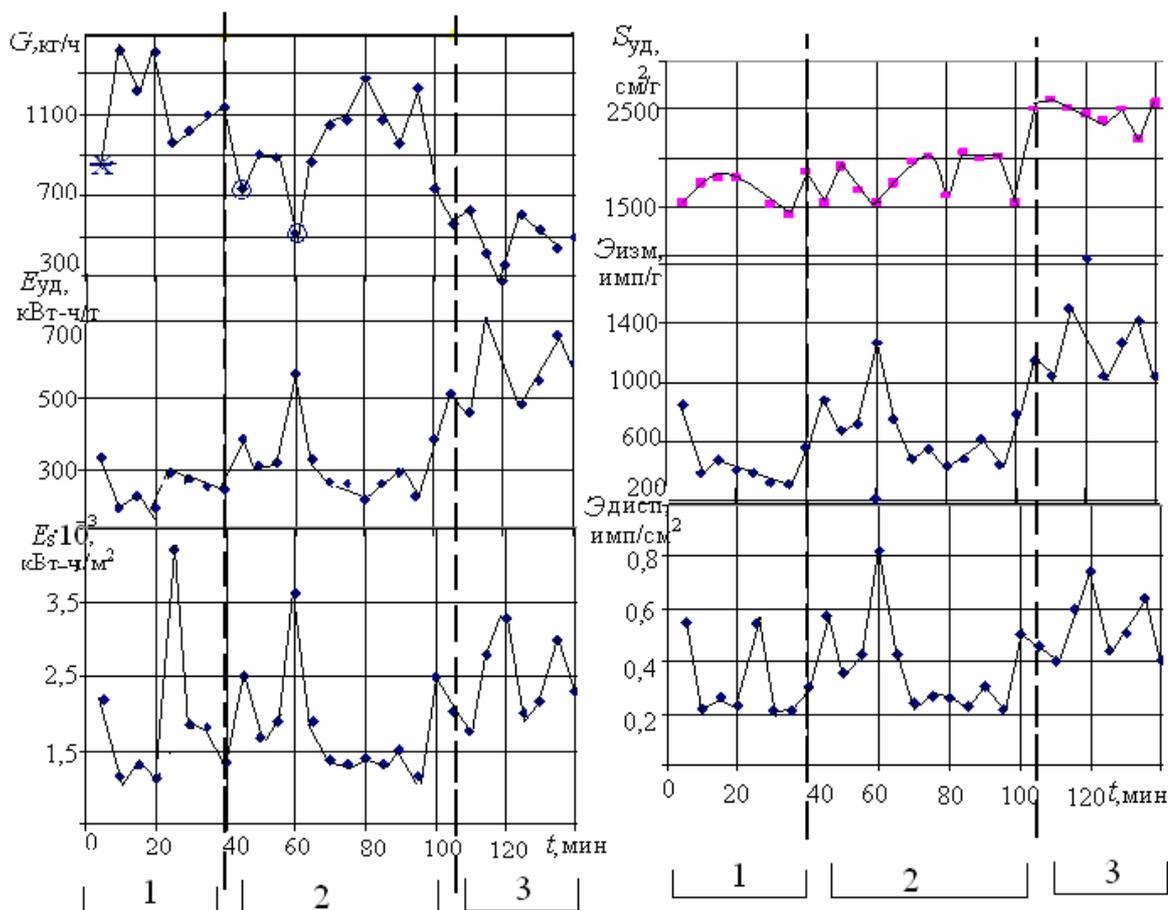


Рисунок 6.13 – Кинетика технологических и акустических значений энергозатрат на измельчение и диспергирование для промышленной струйной мельницы: 1 – $n = 80 \text{ мин}^{-1}$, 2 – $n = 107 \text{ мин}^{-1}$, 3 – $n = 170 \text{ мин}^{-1}$; Ж, ⊙, ♦ - недогрузка, разгрузка, рабочий режим.

На рис. 6.14 показаны линейные зависимости удельных показателей энергозатрат на измельчение и диспергирование от соответствующих акустических показателей при получении кондиционного продукта ($R_{63} \leq 3\%$) различной дисперсности. Вид используемого энергетического показателя ($E_{уд}$, E_s) зависит от предпочтительной технологической задачи: достижение максимальной производительности мельницы (вариант рис. 6.14 а) или поддержание максимальной дисперсности получаемого продукта (вариант рис. 6.14 б).

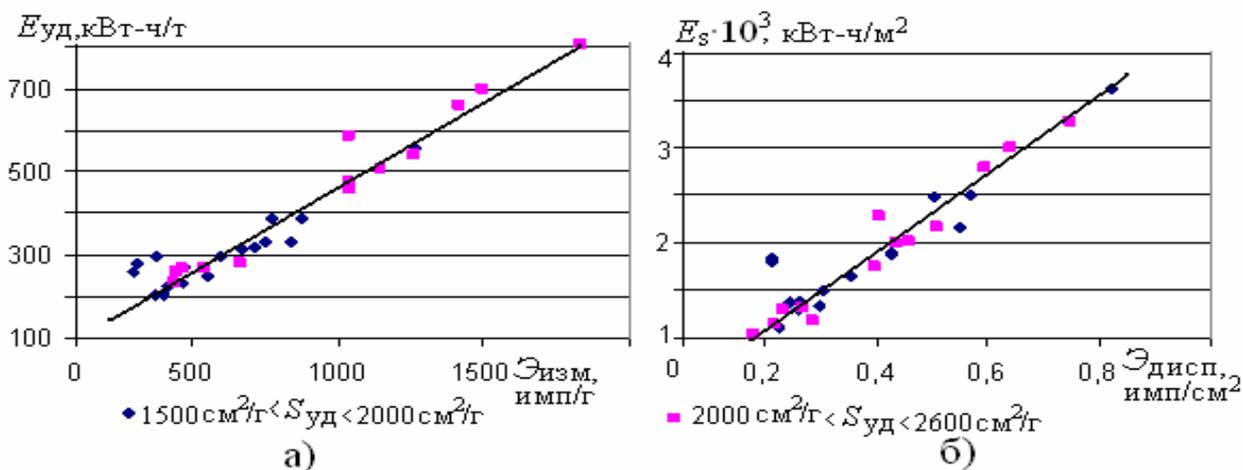


Рисунок 6.14 – Связи удельных технологических и акустических показателей энергозатрат на измельчение и диспергирование.

Таким образом, основу метода оценки энергозатрат при струйном измельчении составляют связи технологических, акустических и энергетических показателей работы мельницы в различных областях дисперсности получаемого готового продукта. Акустический метод оценки энергозатрат на струйное измельчение включает установление акустических показателей энергоемкости измельчения $\mathcal{E}_{изм}$ (имп/г) и диспергирования $\mathcal{E}_{дисп}$ (имп/см²).

На примере работы промышленной струйной мельницы с получением измельченного цирконового концентрата крупностью 63 мкм установлена возможность снижения энергопотребления в 2-2,5 раза путем оптимизации загрузки струй энергоносителя, с одной стороны, и поддержания на минимальном уровне удельной поверхности готового продукта, с другой стороны. Работа мельницы в оптимальном режиме позволит уменьшить энергопотребление струйной мельницы производительностью 800-1400 кг/ч на 150-200 кВт-ч/т для тонкодисперсного продукта ($2000 < S_{уд} < 2600 \text{ см}^2/\text{г}$) и на 70-130 кВт-ч/т при получении грубодисперсного продукта ($S_{уд} < 2000 \text{ см}^2/\text{г}$).

6.6 Создание программных комплексов акустической оптимизации измельчения

Проведенные исследования по измельчению сыпучих материалов в лабораторной установке УСИ-20 позволили установить характерные частоты акустических сигналов зоны измельчения. Амплитуды сигналов на этих частотах отличаются на режимах загрузки, рабочем режиме и разгрузке камеры, в то время как на остальных частотах амплитуды сигналов на различных режимах отличаются незначительно. На рис. 7.9 показаны записи амплитудно-частотных характеристик на всем спектре сигналов зоны измельчения на разных режимах измельчения. Максимальные амплитуды сигналов в районе характерных частот изменяются в зависимости от режима на определенную величину

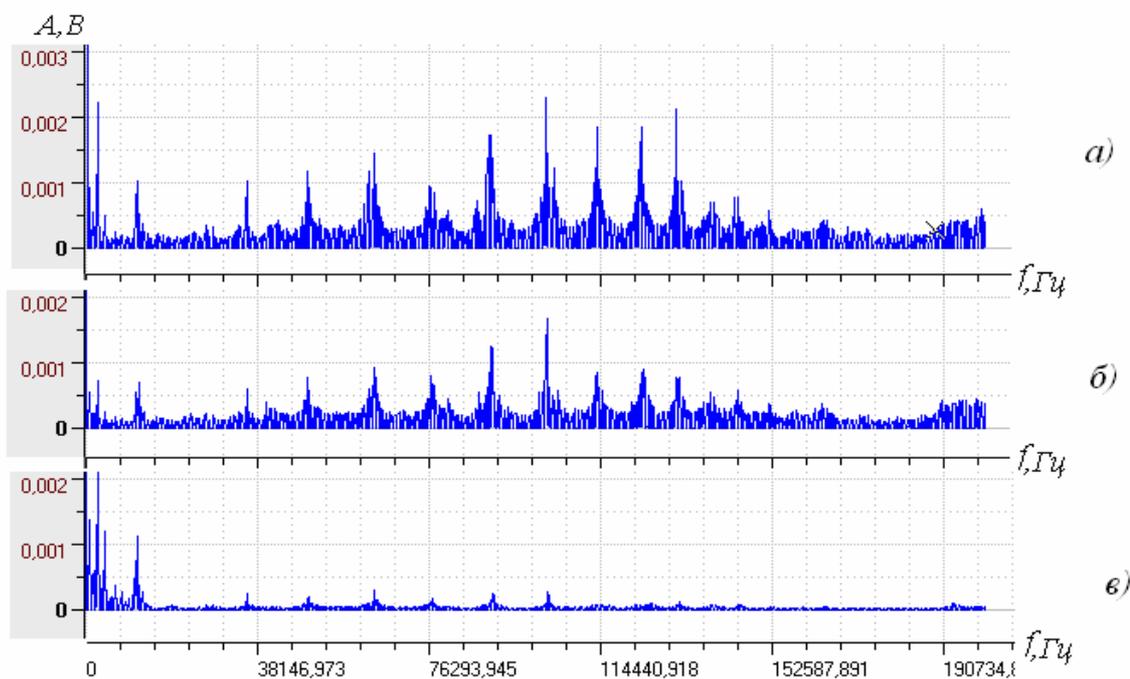


Рисунок 6.16 – Записи амплитудно-частотных характеристик сигналов на разных режимах работы мельницы при измельчении кварцевого песка:

а) – загрузка мельницы; б) – рабочий режим измельчения; в) – разгрузка мельницы

В таблице 6.5 представлены средние амплитуды сигналов в диапазоне характерных частот для различных режимов измельчения.

Таблица 6.5

Значения средних амплитуд сигналов на характерных частотах

Средняя частота в диапазоне, f , кГц	Амплитуда сигналов А,В		
	загрузка	рабочий режим	разгрузка
76	0,001	0,0007	0,0002
90	0,0017	0,0013	0,00023
102	0,0024	0,0015	0,0003
113	0,0018	0,0008	0,0002
123	0,0018	0,0008	0,0002
131	0,0022	0,0007	0,0001

Проведенные исследования показали, что управление загрузкой можно реализовать по величине амплитуды сигналов в районе характерных частот $101,9 < \varphi < 103$. На рис. 6.17 показаны записи амплитудно – частотных характеристик сигналов разных режимов измельчения в диапазоне характерных частот в зоне измельчения кварцевого песка.

Исследования показали несколько путей управления загрузкой струй. Предложенный способ оптимизации [101] основаны на анализе величину максимальной амплитуды в зоне измельчения для каждого материала, установлении величины критерия оптимальности или эффективности измельчения. Затем в ходе мониторинга измеряется текущее значение критерия управления и сравнивается с заданным. В случае отклонения текущих значений подается сигнал на изменение величины загрузки струй материалом до достижения сигналов нужной величины.

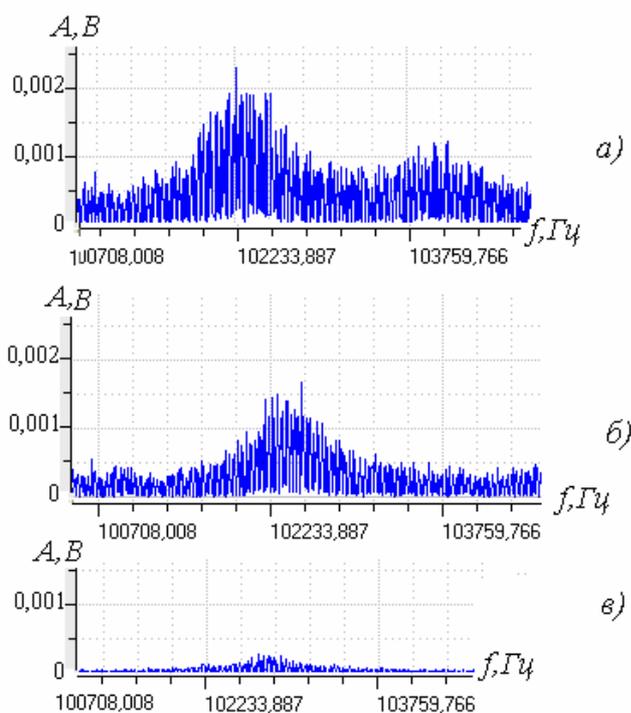


Рисунок 6.17 – Распределение амплитуд на характерной частоте при загрузке (а), рабочем режиме (б) и разгрузке струй (в).

Однако приведенные выше результаты позволяют предложить усовершенствованный алгоритм управления загрузкой: достаточно контролировать величину амплитуды в диапазоне характерных частот для данного материала, например, для кварцевого песка при $102 < \varphi < 103$ кГц, $128 \text{ кГц} < \varphi < 132$ кГц для шлака. Это значительно сокращает и упрощает алгоритм контроля загрузки мельницы на основе результатов акустического мониторинга.

Исследование результатов акустического мониторинга процесса струйного измельчения позволило определить характерные частоты сигналов, в диапазоне которых амплитуды сигналов отличаются при разных режимах измельчения. По амплитудам сигналов с информационными частотами можно судить о режиме измельчения и заполненности мельницы материалом.

На основе установленной связи закономерностей изменения технологических параметров процесса струйного измельчения и амплитудно-частотных характеристик данных акустического мониторинга разработана программа управления этим процессом (см. Приложения).

6.7 Технико-экономическая оценка эффективности применения системы оптимизации работы струйной мельницы

Разработанная система оптимизации проверена на работе струйной мельницы ВГМК в течение 2012-2015гг. При испытаниях промышленной мельницы суммарная акустическая активность зоны помола изменялась в диапазоне: $N_{\Sigma} = (1,3 - 2,3) \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$. При определении акустической активности \dot{N}_{Σ} из суммарного счета N_{Σ} АС за период τ исключался фоновый шум струй энергоносителя $\dot{N}_{\Sigma} = (N_{\Sigma} - N_x) / \tau$ с целью соответствия этого параметра реальному числу соударений частиц в зоне помола. Здесь N_x – число сигналов, характеризующих режим истечения струй без подачи материала в мельницу, т.е. режим «холостого» хода, амплитуда АС менее 0,02 - 0,05 В.

Исследованиями была установлена связь размера \bar{d} (мкм) частиц и удельной поверхности $S_{y\partial}$ продукта с величиной A_{max} (мВ) максимальной амплитуды в спектрах регистрируемых сигналов: $lg A_{max} = 1,47 lg d + 0,05$; $lg A_{max} = -4,08 lg S_{y\partial} + 14,93$. За максимальное значение A_{max} амплитуды принимали наибольшую величину, характеризующую не менее 1% от суммарного счета сигналов.

В таблице 6.6 приведены результаты контрольных промышленных испытаний струйного измельчения цирконового концентрата (2012 – 2015гг.) в условиях Вольногорского горнометаллургического комбината с применением акустического мониторинга зоны помола. Крупность исходного цирконового концентрата составляла 40-160 мкм при содержании в нем класса 63 - 125 мкм порядка 90%. Крупность измельченного продукта марки КЦП - 63 контролировалась величиной остатка на сите 63 мкм и составляла порядка $R_{63} = 1 - 3,7\%$, при этом удельная поверхность изменялась в диапазоне $S_{y\partial} = 1500 - 2000 \text{ см}^2/\text{г}$. Производительность мельницы по готовому продукту изменялась в пределах $G = 700 - 1400 \text{ кг/ч}$. Оценивая реальные энергозатраты (мощность привода компрессора составляет $N = 285 \text{ кВт}$), рассчитываем по-

казатели оценки технологической энергоемкости измельчения и диспергирования циркона.

Таблица 6.6

Результаты промышленного акустического мониторинга с оценкой технологических и энергетических показателей измельчения и диспергирования цирконового концентрата

G, кг/ч	$S_{уд}$, см ² /г	$\mathcal{E}_N^{дисп}$ имп/см ²	$\mathcal{E}_N^{изм}$ имп/г	E_s , Дж/см ²	$E_{уд}$, Дж /г
Оптимальный режим					
1044	1970	0,39	759	0,49	983
1062	2021	0,39	779	0,48	966
1272	2054	0,32	651	0,39	807
1062	2021	0,37	739	0,48	966
1416	1753	0,22	381	0,41	725
1219	1809	0,26	473	0,47	842
1406	1809	0,23	410	0,4	730
1138	1861	0,3	557	0,49	902
990	1496	0,32	475	0,69	1036
1044	1599	0,41	653	0,61	983
1053	1668	0,36	594	0,58	974
1026	1778	0,32	562	0,56	1000
Неоптимальный режим					
738	1815	0,62	1122	0,77	1390
734	1547	0,57	882	0,9	1397
711	1691	0,49	831	0,85	1443
711	1477	6	879	0,98	1443
711	1521	0,66	1003	0,95	1443
720	1699	0,39	660	0,84	1425

Из таблицы видно, что значения акустической энергоемкости измель-

чения $\mathcal{E}_{изм}$ (имп/г) и диспергирования и $\mathcal{E}_{дисп}$ (имп/см²) отличаются для оптимального и неоптимального режима измельчения. Так, при изменении производительности G от 700 до 1400 кг/ч разница $\Delta\mathcal{E}_{изм}$ в энергозатратах составляет величину $\Delta\mathcal{E}_{изм} = 843 - 381 = 462$ имп/г. Переход к оптимальным условиям диспергирования позволяет уменьшить удельные энергозатраты в $\Delta\mathcal{E}_{дисп} = 0,549/0,217=2,5$ раза.

При оценке эффективности применения системы оптимизации важно проверить изменения энергетических показателей в процессе измельчения.

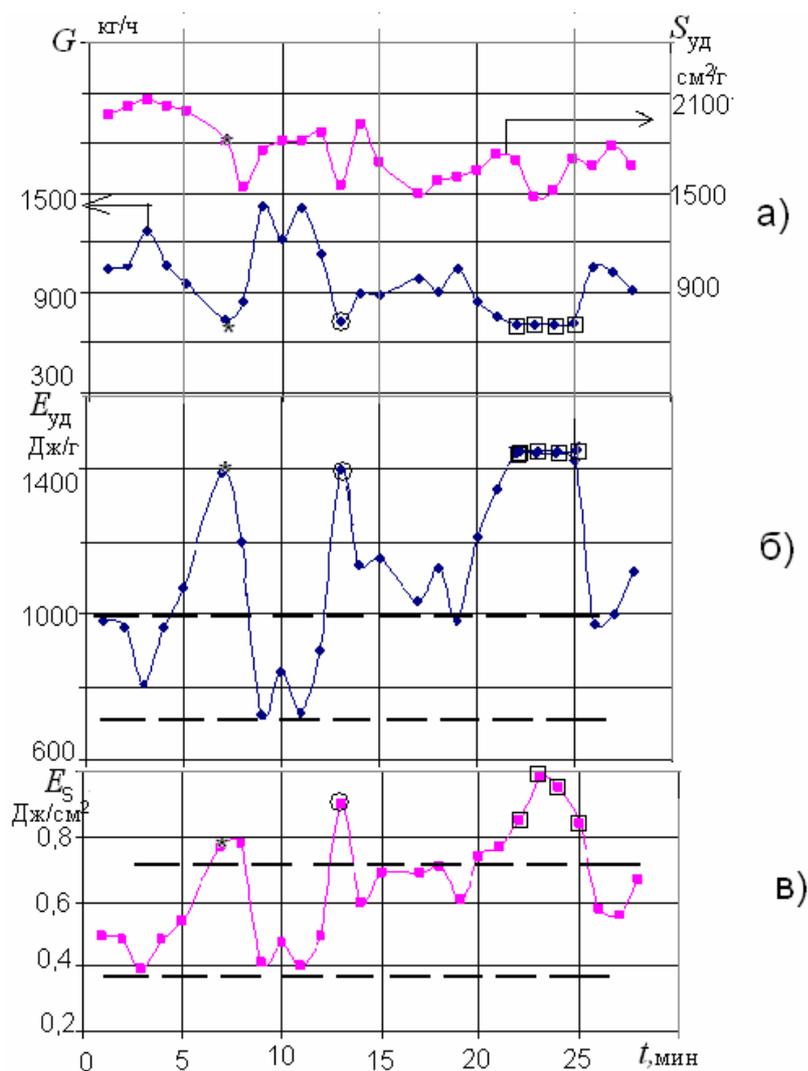


Рисунок 6.18 – Кинетика технологических (G , $S_{уд}$) и удельных энергетических показателей струйного измельчения $E_{уд}$ и диспергирования E_s : режимы степени загрузки струй: * - перегрузка; O – разгрузка; • - рабочий режим; □ - недогрузка; ---- области оптимальной энергоемкости диспергирования и измельчения

На рис. 6.18 отражена кинетика технологических показателей и удельных энергетических показателей измельчения и диспергирования.

На графике обозначены режимы измельчения (а) в различных состояниях загрузки струй твердой фазой (разгрузка, недогрузка, перегрузка, рабочий режим), при этом пунктирными линиями обозначены области энергетически оптимальных режимов загрузки струй, при которых достигаются максимумы производительности по готовому продукту. Установлено, что диапазон изменения в опытах значений минимальной технологической энергоемкости составляет $E_{уд} = 700 - 1000$ Дж/г, $E_s = 0,4 - 0,7$ Дж/см² ($G = 1000-1400$ кг/ч).

На рис. 6.19 представлена кинетика удельной акустической энергоемкости измельчения ($\mathcal{E}_N^{изм}$, имп/г) и диспергирования ($\mathcal{E}_N^{дисп}$, имп/см²), Установлено, что диапазон минимальных значений акустической энергоемкости составляет $\mathcal{E}_N^{изм} = 400 - 700$ имп/г, $\mathcal{E}_N^{дисп} = 0,4 - 0,6$ имп/см².

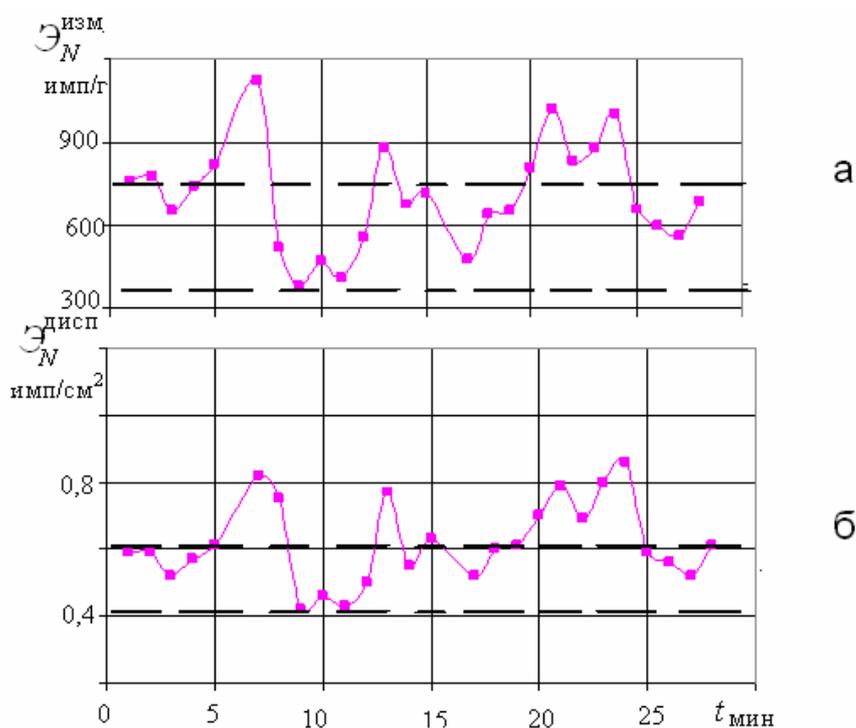


Рисунок 6.19 – Кинетика удельных показателей ($\mathcal{E}_N^{изм}$, $\mathcal{E}_N^{дисп}$) акустической энергоемкости струйного измельчения.

Анализ полученных результатов позволяет считать реальным значи-

тельное снижение удельных энергозатрат на измельчение и диспергирование за счет поддержания оптимальной загрузки струй материалом.

Так максимальная экономия энергии на процесс измельчение может составить до 190 кВт-ч/т при $S_{y\partial}$ порядка 1600 – 1800 см²/г, а на процесс образование новой поверхности продукта ($\Delta S_{y\partial} = 800 - 1000 \text{ см}^2/\text{г}$) может составить до 140 кВт-ч/т.

Внедрение системы оптимизации на основе акустического мониторинга позволило с сохранением качества готового продукта обеспечить повышение производительности мельницы на 47,6 % (при контрольном классе - 63 мкм и $S_{y\partial} = 1800 - 1540 \text{ см}^3/\text{г}$) и 67,6 % (при контрольном классе -45 мкм и $S_{y\partial} = 2590 - 2275 \text{ см}^3/\text{г}$)

Переходя к реальным энергозатратам, оценен годовой экономический эффект от внедрения разработки. Удельная экономия электроэнергии на 1 тонну готового продукта (при цене 0,44 грн/квт-ч) от внедрения системы акустической оптимизации составил, соответственно:

- для продукта менее -63 мкм ($S_{y\partial} = 1540 - 1750 \text{ см}^2/\text{г}$) – 32 - 60 грн/т;
- для продукта менее -45 мкм ($S_{y\partial} = 2500 - 2200 \text{ см}^2/\text{г}$) – 176 - 200 грн/т;

Ожидаемый годовой экономический эффект составил величину порядка 185 – 507 тыс грн, соответственно для получаемого измельченного циркона крупностью 63 и 45 мкм (см. Приложение).

На основе результатов исследований предложены способы акустического контроля и управления процессом струйного измельчения.

Сущность способа, оформленного патентом Украины [101], состоит в следующем. Для каждого материала и технологических параметров измельчения задают контрольные значения амплитуд акустических сигналов, а в ходе мониторинга фиксируют текущие значения амплитуд АС, которые сравнивают с контрольными величинами. При значительном отклонении фиксируемых и контрольных параметров подается сигнал на дозатор загрузочного бункера, и производится изменение загрузки струй материалом.

Для реализации другого способа [113] контроль осуществлялся на основе мониторинга активности акустических сигналов в рабочей зоне измельчения. Предварительно задается величина и допустимая полоса отклонений значений активности сигналов. При выходе текущих значений активности сигналов за пределы допустимой полосы регулируется подача материала на измельчение и при необходимости режим работы классификатора. Промышленное опробование принципов регулирования загрузки струй материалом по предложенным способам показало возможность увеличения производительности струйной мельницы на 20-25 % .

Исследования кинетики технологических и энергетических параметров струйного измельчения циркона в условиях ВГМК показали перспективность применения акустического мониторинга для решения задачи снижения энергоемкости процесса тонкого измельчения. Установлено, что система оптимизации работы струйной мельницы должна быть основана на непрерывном мониторинге акустических параметров ($\dot{N}_{\Sigma}, A_{max}$), используемых для расчета энергоемкости диспергирования ε_N^{discn} и измельчения ε_N^{izm} . Поддержание оптимальных параметров в процессе работы мельницы предлагается реализовать путем непрерывного контроля акустических параметров зоны помола и управления загрузкой измельчаемого материала на основе поиска оптимальной насыщенности струй твердой фазой.

Выводы

1. Предложенная система оптимизации струйного измельчения защищена 4 патентами Украины на изобретение и опробована на промышленном измельчении циркона, получив подтверждение актом внедрения.

2. На примере работы промышленной струйной мельницы с получением измельченного цирконового концентрата крупностью 63 мкм установлена возможность снижения энергопотребления в 2-2,5 раза путем оптимизации загрузки струй энергоносителя, с одной стороны, и поддержания на ми-

нимальном уровне удельной поверхности готового продукта, с другой стороны. Работа мельницы в оптимальном режиме позволит уменьшить энергопотребление струйной мельницы производительностью 800-1400 кг/ч на 150-200 кВт-ч/т для тонкодисперсного продукта ($2000 < S_{y\partial} < 2600 \text{ см}^2/\text{г}$) и на 70-130 кВт-ч/т при получении грубодисперсного продукта ($S_{y\partial} < 2000 \text{ см}^2/\text{г}$).

3. Внедрение системы оптимизации процесса на основе акустического мониторинга позволит обеспечить повышение производительности мельницы на 50 - 70 % в зависимости от дисперсности измельченного продукта (удельная поверхность в диапазоне $S_{y\partial} = 1540 - 2500 \text{ см}^2/\text{г}$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является завершенной научно-исследовательской работой, в которой решена важная научная проблема установления закономерностей и механизма формирования гранулометрического состава продуктов измельчения для достижения необходимой дисперсности при минимальном энергопотреблении. Важнейшие закономерности, которые стали базой развития теории тонкого измельчения полезных ископаемых, включали выявление критического уровня энергоемкости тонкого измельчения и обоснование независимости измельчения фракций в смеси.

На основе установленных закономерностей разработаны модели тонкого измельчения и предложен новый подход к анализу и оптимизации процесса на основе связей технологических параметров и эмиссионных эффектов измельчения, а также использования информационных технологий для идентификации процесса. Все это дало возможность обосновать и разработать методы оптимизации процесса, в результате чего достигнуты требуемые технологические показатели при снижении энергопотребления и соблюдении контрольной дисперсности.

Наиболее важные научные и прикладные результаты, выводы и рекомендации заключаются в следующем.

1. Установлено существование критического уровня энергоемкости тонкого измельчения, который обуславливается типом измельчения и связан с размерами частиц (порядка 10-25 мкм) готового продукта. Приближение к критическому уровню характеризуется значительным увеличением энергоемкости процесса измельчения и обозначает предельные возможности механического раскрытия полезных ископаемых и обогащения. Для исключения перехода величины энергоемкости через критическую величину необходимо осуществлять управление процессом тонкого измельчения, например, с использованием математического моделирования и информационных технологий.

2. Разработан научный подход к снижению удельных энергозатрат в замкнутых циклах тонкого измельчения, который включает выбор оптимального режима классификации по крупности загрузки мельницы более (E^I) и менее (E^{II}) контрольного класса. Это позволило установить величину удельных энергозатрат q_a^V по снова образованному классу a как константу мельницы при измельчении данной руды и рекомендовано использовать ее в уравнении кинетики измельчения, а также для расчета производительности замкнутых циклов измельчения.

3. Доказана независимость кинетики измельчения фракций в смеси сыпучих материалов, которая позволяет прогнозировать изменение их во ходе измельчения, а на этой основе обосновывать технологические схемы и выбор измельчителей.

4. Установлено, что максимальный выход заданного класса крупности в аппаратах с накоплением материала достигается при условии дискретной подачи материала, при этом период дискретности зависит от скорости образования необходимого класса крупности. При моделировании процесса измельчения кварцевого песка в струйной мельнице при дискретной загрузке производительность увеличилась на 1,4%.

5. Создана динамическая модель кинетики изменения гранулометрического состава материала в зоне измельчения, которая позволяет определять длительность измельчения для получения заданного выхода контрольного класса и разработать систему управления производительностью мельницы по величине коэффициента переизмельчения. Установлено, что производительность мельницы зависит при прочих равных условиях от соотношения отдельных фракций в общем объеме материала до и после измельчения. На этой базе разработан оптимизационный критерий управления производительностью мельницы на основе контроля гранулометрического состава и определения удельной поверхности продукта.

6. В результате исследований установлены взаимосвязи основных

технологических и акустических параметров, выявлены следующие закономерности акустического излучения струйной установки:

- амплитуда акустических сигналов и ее распределение по величине характеризуют степень загрузки струй твердой фазой;

- избыточная загрузка струй материалом сопровождается уменьшением амплитуды акустического излучения, что указывает на снижение динамичности измельчения;

- повышение уровня акустической активности зоны помола на любой стадии является фактором роста числа ударов частиц, интенсификации измельчения и увеличения производительности мельницы;

- установлено трехпараметрическую зависимость величины максимальной амплитуды A_{max} (мВ) от размера d (мкм) частиц измельченного продукта и плотности ρ (г/см³) материала в виде $A_{max} = d \cdot 10^{0,4\rho+0,3}$, ($R = 0,8 - 0,9$), которая позволяет прогнозировать ожидаемый размер d частиц готового продукта.

7. Разработан новый метод оптимизации процесса струйного измельчения на основе акустического мониторинга тонкого измельчения. Система оптимизации работы струйной мельницы базируется на непрерывном мониторинге акустических параметров (\dot{N}_{Σ} , A_{max}), использованных для прогнозирования энергоемкости диспергирования $\mathcal{E}_{дисп}$ и измельчения $\mathcal{E}_{подр}$. Оптимальные параметры процесса работы мельница реализованы путем контроля акустических параметров зоны измельчения и управления загрузкой материала на основе поиска оптимальной насыщенности струй твердой фазой.

8. Создана ячеечная модель процесса струйного измельчения, основанная на результатах акустического мониторинга и позволяющая идентифицировать режим измельчения. Результаты верификации математической модели совпадают с установленными связями акустических сигналов и дисперсностью полученного продукта при струйном измельчении

($R = 98,5\%$).

9. Система визуализации и идентификации режимов струйного измельчения, разработанная на основе результатов акустического мониторинга и использующая информационных технологий, позволяет при минимальном количестве начальных экспериментальных данных выполнить выбор оптимальных параметров процесса струйного измельчения для разных материалов и технологических режимов.

10. Определены основные комплексные технолого-акустические критерии работы измельчительной установки: критерий оптимальности, эффективности, циркуляции и дисперсности, позволяющие в значительной мере контролировать и оптимизировать измельчение в ходе его процесса.

11. Разработан метод оценки энергозатрат при струйном измельчении, основу которого составляют связи технологических, акустических и энергетических показателей энергоемкости измельчения $\mathcal{E}_{изм}$ и диспергирования $\mathcal{E}_{дисп}$ в разных пределах дисперсности готового продукта. Экспериментально установлен вид уравнений для технологического энергетического показателя измельчения и диспергирования ($E_{уд}$, E_s), базирующиеся на связях удельных технологических и акустических показателей энергозатрат и связанные с технологической задачей: достижением максимальной производительности мельницы или соблюдением максимальной дисперсности продукта.

12. Результаты теоретических исследований реализованы и подтверждены на лабораторных и промышленной струйной мельнице. Использование акустической оптимизации промышленной мельницы ВГМК показало возможность увеличение ее производительности до 50%, что определило годовой экономический эффект 185-507 тыс. грн в зависимости от крупности цирконового концентрата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев С.Е., Товаров В.В., Перов В.А. Закономерности измельчения и исчисления характеристик гранулометрического состава //Металлургиздат, Москва, 1959.– 437с.
2. Вареных Н.М.,Веригин А.Н., Джангирян В.Г., Ишутин А.Г. Химико-технологические агрегаты механической обработки дисперсных материалов// Санкт-Петербургский Университет, 2002, 482с.
3. The latest developments in fine and ultrafine grinding technologies (Plenary)/M. Gao, R. Holmes, J. Pease//XXIII International mineral processing congress . Tom 1. Istambul, Turkey 3 – 8 september 2006. pp. 30 – 37.
4. Чантурия В.А., Маляров П.В. Обзор мировых достижений и перспективы развития техники и технологии дезинтеграции минерального сырья при обогащении полезных ископаемых/Современные методы технологической минералогии в процессах комплексной и глубокой переработки минерального сырья// Материалы международного совещания «Плаксинские чтения – 2012» г. Петрозаводск, 10–14 сентября 2012 г. 3 – 10с.
5. Перов В.А., Андреев Е.Е., Биленко Л.Ф. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. М.: Недра, 1990. - 301 с.
6. Разрушение. Т.1. Микроскопические и макроскопические основы механики разрушения / Под. ред. Г. Либовиц. Пер. с англ. А.С. Вавакина и др. М.: Мир, 1973.-616 с.
7. Ходаков Г. С. Физика измельчения. - М.: Наука, 1972. -308с.
8. Тамуж В.П., Куксенко В.С. Микромеханика разрушения полимерных материалов. - Зинатне. Рига.- 1978.- 294 с.
9. Куксенко В.С. Диагностика и прогнозирование разрушений крупномасштабных объектов// ФТТ, 2005, том 47, вып. 5.– С. 788 – 794.
10. Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. Физические принципы прогнозирования механического разрушения. – ДАН СССР, 1981, 259, №6.– С. 1350-1352.

11. Куксенко В.С., Томилин Н.Г., Махмудов Х.Ф., Бенин А.В. прогнозирование потери устойчивости нагруженных элементов конструкций методом акустической эмиссии// Письма в ЖТФ.– 2007, том 33, вып. 2.– С/ 67 – 69.
12. Бовенко В.Н. О физических критериях разрушения и диспергирования/ В.Н. Бовенко, Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко // Вестник НТУ «ХПИ».– Харьков.– 2007.– вып.26.– С. 148-153.
13. Бовенко В.Н. Основные положения автоколебательной модели предразрушающего состояния твердых тел // ДАН СССР.-1986.- Т. 286, №5. - С. 1097-1101.
14. Молчанов В.И., Селезнева О.Г., Жирнов Е.Н. Активация минералов при измельчении.–Недра, 1988, 208с
15. Иванов В.И. Белов В.М. Акустикоэмиссионный контроль сварки и сварных соединений.– М.: Машиностроение, 1981.–184 с.
16. Щербаков И.П., В. С. Куксенко, А. Е. Чмель Неэкстенсивный статистический анализ данных высокоскоростной регистрации ударного разрушения твердых тел// Письма в ЖЭТФ, 94:5 (2011), С. 410–413.
17. Веттегрень В.И. Куксенко В.С., Томилин Н.Г., Крючков М.А. Статистика микротрещин в гетерогенных материалах (граниты) // Физика твердого тела. 2004. Т. 46. № 10. С. 1293–1296.
18. Тихонов О. Н. Закономерности эффективного разделения минералов в процессах обогащения полезных ископаемых. М., Недра, 1984., 200 с.
19. Андреев С.Е., Зверевич В.В., Перов В.А. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых, 2-е изд. испр. и доп. — М.: Недра, 1965. - 395 с.
20. Rittinger, P., Lehrbuch der Aufbereitung-Skunde Berlin. 1937. - 106 S.
21. Kich, F. Das Gesetz der proportionalen Viderstande, seine Anwendung — Leipzig. 1935.
22. Бонд Ф.С. Законы дробления: Пер. с англ. В кн.: Труды Европейского совещания по измельчению. М., 1966, с.195-215.

23. Линч А. Дж. Циклы дробления и измельчения// М: Недра.–.1981.–343с.
24. Смирнов С.Ф. Обобщенная ячеечная модель совмещенного процесса измельчения-классификации в технологических системах измельчения/ С. Ф. Смирнов, В. П. Жуков, С. В. Федосов, В. Е. Мизонов// «Строительные материалы».–2008. – №8. – С. 74 – 76.
25. Гийо, Р. Проблема измельчения материалов и её развитие / Перев. С франц. Г.Г. Лунц. – М.: Стройиздат, 1964. 242 с.
26. Борщев В.Я. Оборудование для измельчения материалов: дробилки и мельницы: учебное пособие. Тамбов: из-во ТГТУ, 2004, 75с.
27. Акунов, В.И. Струйные мельницы М.: Машиностроение, 1967, -263 с.
28. Акунов, В.М. Современные измельчители без мелющих тел М.: Промстройиздат, 1967. — 75 с.
29. Биленко Л.Ф., Орлов Ю.И., Костин И.М. Промышленная проверка положения о независимом измельчении компонентов в шаровой мельнице. — Обогащение руд, 1974, №4, С. 20 - 22.
30. Круглова А.Н. Метод акустической эмиссии: исследование разрушения эпоксидных композитов//Известия КазГАСУ, 2009.– №1 (11).–С. 273 – 276.
31. Горобец Л.Ж. Развитие научных основ измельчения твердых полезных ископаемых: Автореф. дис... д-ра техн. наук по спец. 05.15.08 - обогащение полезных ископаемых / НГУ.– Д., 2004. – 35 с.
32. Трипалин А.С. Акустическая эмиссия. Физико-механические аспекты/А.С. Трипалин, С.И. Буйнов//Из-во Ростовского университете, 1986.–160с.
33. Булат А.Ф. Геофизический контроль массива при отработке угольных пластов/ А.Ф. Булат, В.К. Хохолев //Киев: Наук. Думка.–1990.– 168с.
34. Веттегрень В.И. Куксенко В.С., Томилин Н.Г., Крючков М.А. Кинетика и иерархия процесса накопления трещин в гетерогенных материалах. Геодинамика и напряженное состояние недр Земли / Ред. Леонтьев А.В. Новосибирск: Институт горного дела. 2004. С. 373–377.
35. Прядко Н.С. Стохастическая модель газодинамического измельчения //

Техническая механика 2008.-№1.- С. 121-131.

36. Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А., Савельев В.Н., Султанов У. О прогнозировании разрушения горных пород // Изв. АН СССР Физика Земли. 1977. № 6. С. 11-18.

37. Кафаров, В.В. Состояние и перспективы комплексных системных исследований процессов измельчения сыпучих материалов / В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов, С.Ю. Арутюнов // Журнал ВХО им. Д.И. Менделеева. Т. XXXIII.1988. №4. С. 362.

38. Блиничев, В.Н. Разработка оборудования и методов его расчёта для интенсификации процессов тонкого измельчения материалов и химической реакции в твёрдых телах: дис. . д-ра техн. наук Иваново. ИХТИ. 1975 -316С.

39. Смирнов Н. М., Блиничев В. Н., Стрельцов В. В., Гуюмджян П. П. Расчет гранулометрического состава продукта разрушения одиночных частиц. //Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 1977, Т.20. №1, с.123-125.

40. Мизонов, В.Е. Закономерности формирования дисперсного состава угольной пыли при разломе твёрдого топлива / В.Е. Мизонов // Изв. вузов. Энергетика. 1984. №6. С. 95-98.

41. Вердиян, М.А., Кафаров, В.В. Процессы измельчения твёрдых тел / В кн. Процессы и аппараты химической технологии, т.5. -М.: 1977. С. 5-89

42. Таранов В.А. Обзор программ по моделированию и расчету технологических схем рудоподготовки/ В.А. Таранов, В.Ф. Баранов, Т.Н. Александрова // Обогащение руд.– 2013.– №5.– С. 3 – 7.

43. Анищенко В.С. Знакомство с нелинейной динамикой: Лекции соросовского профессора: Учеб. пособие. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002.– 144с.

44. Непомнящий Е.А. Закономерности тонкодисперсного измельчения, сопровождаемое агрегированием частиц // Теор. основы хим. технологии. 1978. т.12. №4. С. 576-580.

45. Непомнящий, Е.А. Кинетика измельчения / Теорет. основы хим.

технологии. 1977. т. 11. № 3. С. 477-480.

46. Александровский А.А., Гамакберов З.Р., Эмих Л.А. и др. Исследование процесса измельчения в вибромельнице // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 1979. Т. 22, № 1. С. 97-100.

47. Зайцев А. И., Бытев Д.О. Ударные процессы в дисперсных системах. - М.: Химия, 1994, 178 с.

48. Кутепов А.М. Стохастическая гидромеханика гетерогенных систем.//Сб. докладов III Межд. конф. "Теоретические и экспериментальные основы создания нового оборудования". Иваново: ИГХТА, 1997. С. 3.

49. Холпанов Л.П. Физико-химические и гидродинамические основы нелинейных процессов химии и химической технологии // Изв. РАН. Сер. хим. 1996 .№ 5. С. 1065-1090.

50. Падохин В.А., Блиничев В.Н., Пигулевский О.Д., Описание измельчителя дисперсных материалов с помощью модели линейного формирующего фильтра //Разработка теории и конструктивного оформления машин и аппаратов интенсивного действия с участием зернистых материалов межвузовский сб. научн. трудов.– Иваново, 1984.– 125с.

51. Мизонов В.Е., Лебедев Д.Е., Смирнов С.Ф., Жуков В.П.. Влияние распределения энергии по фракциям сырья на гранулометрический состав измельченного материала./ Изв. вуз. Химия и химическая технология, - Иваново, 1999, №1, с. 123-124.

52. Пилов П.И. Моделирование замкнутых циклов измельчения руд на основе баланса контрольного класса крупности// П.И. Пилов, Н.С. Прядко// Металлургическая и горнорудная промышленность.– 2013.– №6.– С. 75 – 80.

53. Справочник по обогащению руд. Подготовительные процессы. /Под ред. О.С.Богданова, В.А. Олевского. 2-е изд., перераб. и доп. //М.: Недра, 1982. – с. 366.

54. Справочник по обогащению руд черных металлов/ С. Ф. Шинкоренко, Е. П. Белецкий, А. А. Ширяев и др. 2-е изд., перераб. и доп. под ред. С. Ф. Шинкоренко. //М.: Недра, 1980. – 527 с.

55. Пилов П.И., Прядко Н.С. Моделирование замкнутых циклов измельчения на основе гипотезы Риттингера. //Обогащение полезных ископаемых .– 2012. – №51(92).– С. 98 – 107.
56. Разумов К.А. Проектирование обогатительных фабрик. Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. //М.: Недра, 1982. – 518 с.
57. Ходаков Г.С. Тонкое измельчение строительных материалов 1972г.
58. Иванов А.М. Наукове обґрунтування та створення високоефективних процесів подрібнення в помольному агрегаті з трубним млином на принципі селективності // Автореферат дисерт. д-р техн. наук за спец. 05.17.08 - процеси та обладнання хімічної технології.– НГУ «ХП».– 2006.– 39с.
59. Маляров П.В. Интенсификация процессов измельчения в условиях Талнахской обогатительной фабрики (ТОФ)//Обогащение руд, 2008.– №6.– С. 6 – 10.
60. Смирнов С.Ф. Разработка научных основ процессов формирования фракционных массопотоков в технологических системах измельчения: дис. . д-ра техн. наук / Иваново, 2009. 266с.
61. Ногаева К.А., Арстанбеков Т.Т., Байкелова Г.Ш. Исследование кинетики измельчения полиметаллической руды месторождения Кутесай 2 / К. А. Ногаева, Т. Т. Арстанбеков, Г. Ш. Байкелова // arch.kyribnet.kg/uploads/KSTUNOGAEVA2010-21.pdf.
62. Ракаев А.И., Шумилов П.А. Закономерности измельчения бедных медно-никелевых руд в барабанных мельницах// Вестник МГТУ, том 12, №4, 2009.– С.638-643.
63. Прядко Н.С., Стрельников Г.А., Терновая Е.В., Грушко В.А., Пясецкий Н.Ю., О скорости тонкого измельчения руд мельницами различного типа// Техническая механика 2014.–№3.– С. 114 – 121.
64. Пилов П.И. Принципы минимизации водопотребления при обогащении магнетитовых кварцитов //Металлургическая и горнорудная промышленность.– 1998.– №4.– С. 60 – 63.
65. Самыгин В.Д. Исследование полезных ископаемых на обогатимость /

- В.Д. Самыгин, С.И. Митрофанов, М.Д. Барский М.Д.// М.: Недра, 1974. – 435 с.
66. Гарус В.К. Формализация результатов разделительных процессов в углеобогащении/ В.К. Гарус, О.В. Грачев, В.Ф. Пожидаев, А.Д. Полулях // Луганск:изд-во «НВФ «СТЕК», 2003.–176с.
67. Пилов П.И. Описание фракционных составов и удельной поверхности дисперсных материалов с помощью квадратичного сплайна // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 1999. – Вип. 3(44). – С. 14-19.
68. Gilvarry J.J Distribution function for fragment size in single fracture // J. Appl.phys. – 1961. – №32. – P. 391-399.
69. Gaudin A.M., Meloy T.P. Model and comminuting distribution equation for single fracture // Trans. AIME. – 1962. – №223. – P. 40-43.
70. Пожидаев В.Ф. Прядко Н.С., Грачев О.В. Метод определения среднего размера класса крупности частиц сыпучих материалов // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – 2012. – Вип. 5(82). – С. 89-94.
71. Младецкий И. К. Неитерактивный технологический расчет замкнутых циклов измельчения/ И. К. Младецкий, П. И. Пилов // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков. – 2004. – № 40. – С. 119 – 126
72. Колмогоров А.Н. Теория вероятностей и математическая статистика: (сб. статей).- М.: Наука, 1986.- 535с. (с. 264-266).
73. Прядко Н.С. Исследование законов распределения, используемых для анализа продуктов измельчения / Н.С. Прядко, В.Ф. Пожидаев // Техническая механика .– 2012.– №4.– С. 98 – 104.
74. Пивняк Г.Г. Измельчение. Энергетика и технология/ Г. Г. Пивняк, Л. А. Вайсберг, В. И. Кириченко, П.И. Пилов, В.В. Кириченко // М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2007. – 296 с.
75. Разрушение. Т.1. Микроскопические и макроскопические основы механики разрушения / Под. ред. Г. Либовиц. Пер. с англ. А.С. Вавакина и др. М.: Мир, 1973.-616 с

76. Пилов П.И., Прядко Н.С. Моделирование замкнутых циклов измельчения на основе гипотезы Риттингера. //Обогащение полезных ископаемых .– 2012. – №51(92).– С. 98 – 107.
77. Пилов П.И., Ширяев А.А., Салищева Е.П. Разработка технологии тонкого измельчения окисленных железных руд с получением плотных сливов классификации В кн.: Обогащение слабомагнитных руд черных металлов // М.: Недра, 1984.–С. 3 – 11.
78. H.Schubert. Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe/ Band 1. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. Leipzig, 1968.
79. Карпов К. Имитационное моделирование систем. Введение и моделирование с АпуLogic 5. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. - 400 с.
80. Смирнов С.Ф. Обобщенная ячеечная модель совмещенного процесса измельчения-классификации в технологических системах измельчения/ С. Ф. Смирнов, В. П. Жуков, С. В. Федосов, В. Е. Мизонов// «Строительные материалы».–2008. – №8. – С. 74 – 76.
81. Пожидаев В.Ф, Прядко Н.С., Ветров А.А. Математическое моделирование процесса сжигания угля в поточном кипящем слое//Системные технологии.–2004.– №1(30).– С.41–46.
82. Мирзонов В. Е. Применение теории марковских цепей к моделированию механических процессов химической технологии // В.Е. Мизонов, Е. А. Баранцева, Н. Berthiaux, К. Marikh // V Межд. Научн. конф. Технологических процессов и оборудования» Сб. трудов. 26 - 28 июня.– Иваново, 2001.– С. 92 – 94.
83. Пилов П.И., Горобец Л.Ж., Бовенко В.Н., Прядко Н.С. Акустические и технологические характеристики процесса измельчения в струйной мельнице /Известия вузов. Горный журнал, № 4, 2009. – С. 115-121.
84. Горобец Л.Ж., Прядко Н.С., Шуляк И.А., Соболевская / Интенсификация процесса струйного измельчения на основе анализа акустических параметров.- Вибрации в технике и технологиях, № 2(54), Винница, 2009. –С. 15-19.

85. Пилов П.И. Закономерности акустического мониторинга струйного измельчения полезных ископаемых / Пилов П.И., Горобец Л.Ж., Прядко Н.С., Бевзенко Б.Ф., Краснопер В.П. // Збагачення корисних копалин.- НГУ– Дн-ск. – 2011.– №44 (84) С. 25 – 32.
86. Горобец Л.Ж., Прядко Н.С., Шуляк И.А., Верхоробина И.В. Исследование связи акустических и технологических параметров процесса струйного измельчения. - Вестник НТУ «ХПИ».- 2006.-№30.– С. 16-21.
87. Ф.Уоссермен Нейрокомпьютерная техника// М.: Мир.–1992- 248с.
88. Новоселов О.Н. Идентификация и анализ динамических систем: монография / 2-е изд.–М.: Изд-во Моск. гос. ун-та леса, 2007.–316с.
89. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / под ред. Н.Д. Егупова.– М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2002.– 744с.
90. Купін А.І. Інтелектуальна ідентифікація та керування в умовах процесів збагачувальної технології.– Кривий Ріг: Видавництво КТУ, 2008.– 204с.
91. Прядко Н.С. Информационная технология получения тонкодисперсных материалов струйным измельчением/ Н. С. Прядко, Т. М. Буланая, Л. Ж. Горобец, Ю. Г. Соболевская, Н. П. Сироткина.– Системные технологии: региональный межвузовский сборник научных трудов. – Днепропетровск. – 2010. – Вып. 3(58). – С. 40 – 46.
92. Горобець Л.Ж. Застосування акустоемісійного моніторингу щодо струменевого подрібнення / Л. Ж. Горобець, І. В. Верхоробіна, Н. С. Прядко, Г. О. Стрельніков.– Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні.–Львів.- 2006.–вип. 40.–С. 69 – 74.
93. Прядко Н. С. Анализ качества продукта струйного измельчения на основе акустического мониторинга / Н. С. Прядко // Техническая механика. – 2010. – № 2. – С. 81 – 86.
94. Прядко Н.С. Акустические исследования струйного измельчения// LAP LAMBERT Academic Publishing.–OmniScriptum GmbH&Co.Kg.–2013.– Saarbrucken Germany.–172с.
95. Параметры акустического излучения промышленной газоструйной

установки / П. И. Пилов, Л. Ж. Горобец, В. Н. Бовенко, Н. С. Прядко, А. Е. Щербаков, И. В. Верхоробина // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков. – 2007. – № 27. – С. 33 – 41.

96. Бовенко В. Н. О физических критериях разрушения и диспергирования / В. Н. Бовенко, Л. Ж. Горобец, Н. С. Прядко // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков. – 2007. – № 26. – С. 148 – 153.

97. Система анализа акустических сигналов газоструйной мельницы / Н.С. Прядко, Л.Ж. Горобець, Ю.Г. Соболевская, В.П. Краснопер, Р.А. Сухомлин // Збірник наукових праць Національного гірничого університету – Дн-ск. – 2013.– № 43 – С. 38 – 42.

98. Михалев А.И. Анализ процесса тонкого измельчения материалов на основе Гильберта–Хуанга и вейвлет – преобразований акустических сигналов // А.И. Михалев, Н.С. Прядко, Р.А. Сухомлин// Сб. материалов IX Конгресса обогатителей стран СНГ, т.1 .– МИСиС.– 2013.– С. 409 – 412.

99. Акустический мониторинг работы струйных мельниц различного типоразмера / Пилов П.И., Горобец Л.Ж., Прядко Н.С., Цыбулько Л.А., Верхоробина И.В.// Вестник НТУ «ХПИ».– Харьков.– 2011.– вып. 50.– С. 3 -10.

100. Прядко Н.С. Акустико-эмиссионный мониторинг процесса струйного измельчения // Техническая диагностика и неразрушающий контроль 2012.- № 6.- С. 46 – 52.

101. Патент України № 104427 Спосіб моніторингу струминного подрібнення і газоструминний млин/ Пілов П.І., Горобец Л.Ж., Прядко Н.С.// опубл. 10.02.2014, бюл. № 3, заяв-ка № а201016004 опубл. 10.07.2012, бюл. № 13.

102. Кинетика измельчения смеси фракций крупности /Пилов П.И., Прядко Н.С., Терновая Е.В. //Збагачення корисних копалин, № 57(98), 2014, С. 101 – 106.

103. В.Е. Мизонов, Д.Е. Лебедев, С.Ф. Смирнов, В.П. Жуков. Влияние распределения энергии по фракциям сырья на гранулометрический состав измельченного материала./ Изв. вуз. Химия и химическая технология, -

Иваново, 1999, №1, с. 123-124.

104. Имитационное моделирование кинетики тонкого измельчения /Прядко Н.С., Саксонов Г.М., Терновая Е.В. //Вестник НТУ «ХПИ».– Харьков.– 2014.– вып. 53(1095) – С. 89 – 97.

105. Pryadko N.S. Optimization of fine grinding on the acoustic monitoring basis // Power Engineering, Control & Information Technologies in Geotechnical Systems – 2015.– Taylor & Francis Group, London, p. 99-108.

106. Коузов, П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельчённых материалов М.: Химия, 1974. - 280 с.

107. Акустическое исследование размеров частиц в потоках газозвеси /Горобец Л.Ж., Прядко Н.С., Краснопер В.П., Самофал И.В. // Збагачення корисних копалин, № 58(99)-59(100), 2014, С.54 – 60.

108. Прядко Н.С. Информационные технологии для управления тонким измельчением / Прядко Н.С., Стрельников Г.А.// Техническая механика №4, 2014, С.118 – 125.

109. Возможности акустического прогнозирования гранулометрии частиц при струйном измельчении /Горобец Л.Ж., Прядко Н.С., Левченко К.А., Машкова Т.Ю., Верхоробина И.В.//Вестник НТУ «ХПИ».– Харьков.– 2014.– вып. 52(1094). – С. 10 - 18.

110. Акустический метод оценки энергозатрат на струйное измельчение/ Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко, В.П. Краснопер, П.А. Бакум // Збагачення корисних копалин. – НГУ– Дн–ск. – 2014.– №56 (97) С. 94 – 102.

111. Снижение энергоёмкости тонкого измельчения с использованием информационных технологий // Пилов П.И., Горобец Л.Ж., Прядко Н.С., Левченко К.А., Машкова Т.Ю. //Сб. тезисов междунар. научн.-техн. конф. «Комбинированные методы переработки минерального сырья: теория и практика», 19-20 мая 2015г., Санкт-Петербург.

112. Закономерности кинетики энергетических параметров промышленного струйного измельчения Горобец Л.Ж., Прядко Н.С., Бакум П.А. //Збагачення корисних копалин, № 60(101), 2015, С. 67 – 73.

113. Патент № 98405 Спосіб регулювання газоструминного подрібнення / Пилов П.И., Горобец Л.Ж., Коваленко М.Д., Стрельников Г.А., Прядко Н.С. / опубл. 10.05.2012, Бюл. № 9, заявка № 201100939, опубл. 28.01.2011.
114. Сокур М.И., Воробйов О.М., Сокур І.М. Энергозбереження в процесах збагачення руд: Монографія: Кременчук: видавництво ПП Щербатих О.В., 2012 – 300 с.
115. Губин Г.В. Инновации ждут применения / Г. В. Губин, В. И. Мулявко, Г Г Губин //Вісник Криворізького техніч. універ.– 2013, №34. – С. 74-76.
116. Власов О.Е., Смирнов С.А. Сравнение показателей работ различных измельчителей // Теор. основы хим. технологии. 1986. т. 2. № 4. С. 831-837.
117. Ревнивцев В.И., Гапонов Г.В., Зарогатский Л.П. и др. Селективное разрушение материалов. - М.: Недра, 1988. - 286 с.
118. Серго Е.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. - М.: Недра, 1985.-285 с.
119. Соколов Е.Я., Зингер Н.М, Струйные аппараты. 2-е изд. – М.: Энергия, 1970. -288 с.
120. В.Е. Мизонов, Д.Е. Лебедев, С.Ф. Смирнов, В.П. Жуков. Влияние распределения энергии по фракциям сырья на гранулометрический состав измельченного материала./ Изв. вуз. Химия и химическая технология, – Иваново, 1999, №1, с. 123-124.
121. Дешко Ю.И, Креймер М.Б., Крыхтин Г.С. Измельчение материалов в цементной промышленности // М.; Наука, 1983. – 252 с.
122. Васильев А.М. Введение в статистическую физику. М: Высшая школа, 1980, 178 с.
123. Гридчин А.М., Севостьянов В.С., Лесовик В.С., Горлов А.С, Перельгин Д.Н., Романович А.А., Колесников А.В. Энерго-ресурсосберегающие комплексы тонкого и сверхтонкого измельчения материалов// Известия ВУЗов. Строительство 2006 г.- №11. – С.60-67.
124. Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Арутюнов С.Ю. Системный анализ процессов химической технологии. М.: Наука, 1985. – 440 с.

125. Баранов В.Ф., Вайсберг Л.А. Тенденции развития технологии и техники рудоподготовки // «Современные методы технологической минералогии в процессах комплексной и глубокой переработки минерального сырья».- Материалы международного совещания «Плаксинские чтения – 2012», г. Петрозаводск, 10–14 сентября 2012 г. – С. 12- 16.
126. Качанов Л.М. Основы механики разрушений. М: Наука, 1974. –311 с.
127. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. -М.: Наука, 1974. – 640 с.
128. Батунер Л.М., М. Е. Позин Математические методы в химической технологии//Из-во «Химия», 1971.- 824с.
129. Voller V.R. A note on energy - size reduction relationships in comminution // Powder Technol. 1983. V. 36. No. 2, P. 281-290.
130. Котова О.Б., Ожогина Е.Г., Рогожин А.А. Инновационные подходы к оценке качества минерального сырья // Современные методы технологической минералогии в процессах комплексной и глубокой переработки минерального сырья».- Материалы международного совещания «Плаксинские чтения – 2012», г. Петрозаводск, 10–14 сентября 2012 г. – С. 21- 26.