ОТЗЫВ официального оппонента

Бобкова Владимира Ивановича на диссертационную работу **Бабкина Михаила Андреевича** на тему «Разработка математической модели и цифрового двойника процессов измельчения в планетарной мельнице», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Актуальность

Процессы тонкого измельчения являются ключевым звеном в производстве порошков для фармацевтики, керамики, металлургии и других отраслей, где требования к однородности и специфической поверхности материала постоянно растут. Существует явный разрыв между классическими эмпирическими моделями дробления и необходимостью физически обоснованного описания процессов, учитывающего как кинетику разрушения, так и термодинамические аспекты устойчивости частиц.

Одновременно с этим растёт запрос на цифровизацию технологических цепочек: применение цифровых двойников и виртуальных испытаний позволяет значительно сократить время и затраты на отладку режимов работы оборудования. В этих условиях разработка интегрированных математических моделей, основанных на принципе минимума производства энтропии и аппарате гетерогенных сред, приобретает особую значимость. Итоговая реализация модели открывает возможности для обучения специалистов и быстрого тестирования технологических сценариев без дорогостоящих физических экспериментов.

Структура, объем и содержание

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (110 наименований) и пяти приложений. Общий объем работы — 188 страниц, включая 32 рисунка и 7 таблиц.

Введение содержит обоснование актуальности исследования измельчения в планетарных мельницах, учитывая как промышленную востребованность тонкого измельчения, так и научную необходимость физико-термодинамического описания процесса. Формулируются цель работы — создание математической модели и цифрового двойника. Устанавливаются задачи: проведение экспериментальных исследований, разработка термодинамического критерия устойчивости, построение кинетической модели и её компьютерная реализация.

Глава 1 представляет собой подробный обзор литературных источников. Рассматриваются классические подходы к описанию дробления: метод моментов, баланс числа частиц (PBM), дискретные модели DEM, эмпирические зависимости. Анализируются как их достоинства, так и ограничения, такие как необходимость эмпирических параметров, высокая вычислительная сложность.

Глава 2 посвящена экспериментальной части. Описана установка планетарной мельницы, геометрия барабана и шаров, параметры вращения (200 об/мин). Приведена методика подготовки образцов оксида алюминия: исходный размер — 35 мкм, среда — этанол, шары из циркония диаметром 2 и 5 мм, соотношение масс 3:1 и 5:1. Приведены таблицы конечных средних размеров частиц (минимум 1,83 мкм) и кинетические кривые для четырёх режимов.

Глава 3 разрабатывает термодинамическую модель процессов дробления. Сначала выводятся уравнения сохранения массы, импульса и энергии для гетерогенной дисперсной системы, затем — уравнение баланса энтропии с разделением на обмен и внутреннее производство. Введены термодинамические потоки и силы дробления: формула движущей силы. Применением принципа минимума производства энтропии Пригожина получена зависимость устойчивого диаметра.

На основе экспериментальных данных построена регрессионная модель удельной мощности измельчения как функции от соотношения масс и геометрического параметра (размера мелющих тел).

Глава 4 посвящена построению и решению кинетической модели дробления. Формулируется интегро-дифференциальное уравнение баланса числа частиц. Уравнение обезразмерено и аппроксимируется методом дробных шагов: схема предиктор–корректор обеспечивает второй порядок по времени и размеру.

Подбор коэффициентов выполнен градиентным спуском по критерию минимума отклонения от экспериментальных средних размеров. Результаты расчётов сопоставлены с четырьмя кривыми из экспериментов, подтверждая адекватность модели.

Глава 5 описывает создание цифрового двойника в Unreal Engine 5. Приведена структура программного комплекса, включающего трёхмерную модель мельницы, интерфейс управления и динамическую панель с текущим размером частиц и временем. Интеграция расчётной части с визуализацией обеспечивает обучающий опыт. Описаны сценарии: проведение виртуальных экспериментов, анализ влияния режимов измельчения.

В заключении суммируются основные результаты, подчёркиваются научная новизна и практическая значимость, а также предлагаются направления дальнейших исследований: расширение модели на разные материалы, учёт взаимодействия частиц и внедрение адаптивных алгоритмов управления процессом.

Научная новизна

Сформулирован термодинамический критерий устойчивого размера частиц при измельчении на основе принципа минимума производства энтропии.

Выведена аналитическая зависимость вероятности дробления от удельной мощности, физических свойств материала и размеров частиц.

Разработана численная схема решения интегро-дифференциального уравнения баланса числа частиц со вторым порядком аппроксимации.

Реализован цифровой двойник мельницы, объединяющий математическую модель и VR-среду для исследования процессов измельчения.

Достоверность и обоснованность результатов

Результаты экспериментов согласуются с расчётными данными модели в пределах допустимой погрешности. Применяемые численные алгоритмы прошли проверку на устойчивость, сохранение материального баланса и соответствие предсказаний эксперименту. Публикации в международных изданиях и апробация на профильных конференциях подтверждают достоверность полученных выводов.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы

Теоретическая значимость диссертации состоит в развитии и углублении концепции моделирования процессов дробления частиц с использованием аппарата термодинамики необратимых процессов. Объединён формализм неравновесной термодинамики (принцип минимума производства энтропии) с уравнениями баланса числа частиц, что позволяет описывать устойчивый размер частиц и кинетику их разрушения в единой физико-математической модели.

Предложенные аналитические зависимости и численные схемы расширяют класс традиционных популяционных моделей и методологию их решения, обеспечивая второй порядок аппроксимации по времени и размеру. Разработанный подход может быть адаптирован для моделирования других типов мелющих устройств.

Практическая значимость работы определяется тем, что полученная модель и её цифровая реализация в виде цифрового двойника дают инструмент для оптимизации реальных процессов измельчения.

На основе аналитических зависимостей возможно проектировать режимы работы мельницы с учётом энергопотребления и обеспечения требуемого предельного размера частиц. Цифровой двойник обеспечивает быстрое и безопасное тестирование различных вариантов работы установки без затрат на физические испытания, что особенно важно в образовательной и научно-исследовательской среде.

Разработанный программный комплекс может быть интегрирован в системы автоматизированного управления производственными мельницами и систем предиктивной диагностики, повышая их надёжность и эффективность.

Рекомендации по использованию результатов

Разработанные математические модели и программные средства моделирования могут быть внедрены в исследовательских и проектных организациях, занимающихся оптимизацией и анализом процессов измельчения материалов. Их применение целесообразно при проведении вычислительных экспериментов, подборе режимов работы мельниц и разработке систем автоматизированного управления данными технологическими процессами.

Замечания

1. В разделе, описывающем цифровой двойник, отсутствует количественная оценка его влияния на образовательный процесс. Не приведены данные, сравнивающие эффективность традиционного и VR-обучения.
2. В диссертации описывается расчёт удельной мощности на измельчение (ε) в модели, но не приведены численные значения, что затрудняет оценку предсказаний модели по энергоэффективности.

3. В тексте встречаются единичные неточности и неоднозначности обозначений.

Указанные замечания не принижают значимости работы и не влияют на положительную оценку диссертационной работы Бабкина Михаила Андреевича.

Соответствие диссертации предъявленным требованиям

Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, включая следующий перечень пунктов:

Пункт 3. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.

Пункт 4. Разработка новых математических методов и алгоритмов интерпретации натурного эксперимента на основе его математической модели.

Пункт 5. Разработка новых математических методов и алгоритмов валидации математических моделей объектов на основе данных натурного эксперимента или на основе анализа математических моделей.

Пункт 8. Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.

Заключение

Представленная диссертация полностью соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, предусмотренным Положением о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет

имени Д.И. Менделеева», утвержденным приказом и.о. ректора РХТУ им. Д.И. Менделеева № 103 ОД от 14 сентября 2023 г., а ее автор, Бабкин Михаил Андреевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент:
заведующий кафедрой высшей математики
филиала ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский университет «МЭИ»
в г. Смоленске,
доктор технических наук,
профессор 29.08.2025 **Владимир Иванович Бобков**

Шифр научной специальности, по которой защищена докторская диссертация: 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (химическая технология)
Профессор по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Подпись В.И. Бобкова заверяю

ученый секретарь ученого совета филиала ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске, д.э.н.
Кириллова Е.А.

Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске

Почтовый адрес: 214013, Россия, г. Смоленск, Энергетический проезд, д.1
Телефон: +7 9[illegible]
Адрес электронной почты: vov