

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Бабкина Михаил Андреевич на тему «Разработка математической модели и цифрового двойника процессов измельчения в планетарной мельнице» представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Объектом исследования данной работы являются процессы измельчения твёрдых материалов в планетарной мельнице, моделируемые с использованием термодинамических подходов и реализуемые в виде программного комплекса. Исследование направлено на построение кинетической модели дробления с физическим обоснованием устойчивого размера частиц и применение этой модели в цифровой инженерной среде.

В автореферате представлены результаты комплексного теоретико-экспериментального подхода, включающего построение математической модели с применением принципа минимума производства энтропии, проведение лабораторных экспериментов по измельчению оксида алюминия, разработку программного обеспечения и реализацию цифрового двойника в среде виртуальной реальности.

Диссертантом проведены экспериментальные исследования на планетарной мельнице при различных сочетаниях режима измельчения, включая варьирование размера шаров и соотношения масс шаров к порошку. Полученные данные использовались как для калибровки модели, так и для проверки её адекватности. Методика измерений основана на лазерной дифракции, что обеспечивает высокую точность определения размеров частиц.

В работе были получены математические модели, описывающие кинетику измельчения с использованием уравнений популяционного баланса, дополненных термодинамическими функциями дробления и распределения. Также реализованы численные алгоритмы второго порядка аппроксимации, позволяющие проводить моделирование динамики измельчения с учётом физико-химических параметров системы.

Новизной в работе является то, что в математическое описание впервые включён вариационный принцип минимума производства энтропии как критерий устойчивости дисперсной системы, что позволило количественно определить предельный размер частиц в зависимости от режима измельчения. Значительным вкладом является также разработка цифрового двойника, сочетающего VR-интерфейс и физически обоснованную математическую модель, применимую в учебной и производственной практике.

По автореферату имеются следующие замечания:

1. Отсутствие анализа ограничений модели. В автореферате не обсуждаются границы применимости предложенной модели. Неясно, при каких режимах или типах измельчаемого материала модель может давать некорректные результаты или терять точность. Также не освещено, как адаптируется модель к условиям, отличающимся от лабораторных.

2. Отсутствие данных о воспроизводимости результатов. В описании экспериментальной части не указано, проводились ли повторные измерения для подтверждения стабильности и воспроизводимости полученных данных. Упоминание статистической обработки или среднеквадратических отклонений отсутствует.

Несмотря на приведённые недостатки, работа диссертанта является самостоятельным, завершённым и актуальным исследованием, выполненным на высоком научно-методическом уровне. Автореферат адекватно отражает основные положения диссертационной работы, полученные результаты демонстрируют научную новизну и значительный прикладной потенциал.

Считаю, что Михаил Андреевич Бабкин заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2. – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника»

«25» 08 2025 г.

Шутенков Александр Васильевич

Подпись, ученую степень, ученое звание
и должность удостоверяю

Ученый секретарь

«26» 08 2025 г.

Прокопчук Е.В.

ФГАОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

634050, г. Томск, пр. Ленина, 40

Тел.: +7 (3822) 41-39-15, внутр. 2061