

## **ОТЗЫВ**

на автореферат диссертационной работы

**Бабкина Михаила Андреевича «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 диссертационной работы являются процессы измельчения твёрдых материалов в планетарной мельнице, в частности, измельчение порошка оксида алюминия. Исследование направлено на создание математической модели, описывающей кинетику процесса с учётом термодинамических и механических факторов, а также разработку цифрового двойника планетарной мельницы.

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения эффективности процессов измельчения в различных отраслях промышленности, включая производство керамики, катализаторов, наноматериалов и аккумуляторов. Использование планетарных мельниц связано с достижением высоких степеней диспергирования, однако существующие подходы к моделированию процессов измельчения имеют ограничения по точности и универсальности.

В автореферате представлены результаты комплексных экспериментальных и теоретических исследований. Особенностью работы является применение принципа минимума производства энтропии для определения устойчивого к дроблению размера частиц, что позволило предложить физически обоснованный критерий прекращения измельчения. Также разработанная математическая модель, включает функции дробления и распределения, основанные на термодинамическом подходе, и реализован программный комплекс с визуализацией процесса в VR-среде.

В работе разработаны численные схемы для решения интегро-дифференциального уравнения баланса числа частиц, построены регрессионные модели для расчёта удельной мощности, применены методы машинного обучения для уточнения параметров процесса. Проведена валидация модели на основании экспериментальных данных, полученных при измельчении  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , и показана высокая точность результатов.

Практическая значимость работы подтверждена внедрением программного обеспечения в учебный процесс, а также регистрацией программных продуктов. Использование цифрового двойника открывает перспективы для обучения операторов, оптимизации технологических режимов и анализа кинетики разрушения.

По автореферату имеются следующие замечания:

1. Не пояснено, каким образом был проведён подбор функции распределения дочерних

частиц (уравнение 12). Несяна чувствительность модели к выбору этой функции и её влияние на точность расчётов.

2. Недостаточное описание условий экспериментов. В автореферате описаны опыты по измельчению  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , однако не указаны некоторые ключевые параметры, такие как фактическая масса измельчаемого материала, масса шаров, контроль температуры и продолжительность периода семплирования. Эти данные важны для воспроизводимости и оценки экспериментальной погрешности.

Отмеченные недостатки не снижают общего положительного впечатления от проделанной диссертантом работы, выполненной на высоком научно-техническом уровне. Оформление автореферата соответствует установленным требованиям. Результаты обладают новизной и практической значимостью и могут быть использованы в образовательной и производственной деятельности.

Таким образом, Михаил Андреевич Бабкин достоин присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2. – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Главный научный сотрудник лаборатории механики многофазных систем ИМех УФИЦ РАН, доктор физико-математических наук (специальность 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы), старший научный сотрудник

e-mail: [bolotnova@anrb.ru](mailto:bolotnova@anrb.ru)

«27» августа 2025 г.

*J*

*ra*

Болотнова Раиса Хакимовна

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИМех УФИЦ РАН)

450054, г. Уфа, Проспект Октября, 71

телефон: +7(347)2355255 e-mail: [imran@anrb.ru](mailto:imran@anrb.ru)

Согласна на обработку персональных данных

«27» августа 2025 г.

*Tz*

*ra*

Болотнова Раиса Хакимовна

Подпись Р.Х. Болотновой заверяю:

Ученый секретарь ИМех УФИЦ РАН

Э.Ф. Гайнуллина

«27» августа 2025 г.