

ОТЗЫВ

официального оппонента Еремина Антона Владимировича на диссертационную работу Бабкина Михаила Андреевича «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 работы обусловлена необходимостью углублённого изучения физико-механических и термодинамических аспектов процессов измельчения для повышения их энергоэффективности в таких областях, как материаловедение, химическая промышленность, горное дело и др. Особую значимость имеет разработка математических моделей, учитывающих термодинамические закономерности, и их внедрение в производство, цифровые двойники и образовательные программы. В этой связи работа Михаила Андреевича Бабкина, посвящённая созданию математической модели процессов измельчения с последующей реализацией в виде интерактивного цифрового двойника, является актуальной, междисциплинарной и соответствует приоритетным направлениям развития цифрового инжиниринга.

Структура, объем и содержание

Диссертационная работа Михаила Андреевича Бабкина состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (110 наименований) и пяти приложений. Общий объем работы – 188 страниц, включая 32 рисунка и 7 таблиц.

Во введении сформулированы цель и задачи исследования, обоснованы актуальность и научная новизна, выделены основные положения, выносимые на защиту, указаны методы исследования и апробация полученных результатов.

Первая глава содержит обзор существующих теорий и моделей, описывающих процессы измельчения, в том числе эмпирические и теоретические подходы. Проведен анализ аспектов измельчения, выявлены ограничения традиционных моделей. Обоснована необходимость построения модели, включающей термодинамический подход описания процесса дробления.

Вторая глава посвящена проведению экспериментальных исследований, направленных на изучение поведения как среднего размера частиц во времени, так и распределения частиц сплошной фазы при дроблении в планетарной мельнице. Определено, что при длительном измельчении, средний размер приходит к константному значению с минимальным дальнейшим отклонением.

Третья глава представляет собой развитие термодинамической модели процессов измельчения. С использованием подхода неравновесной термодинамики приведены уравнения баланса массы, энергии и энтропии для системы «твёрдое тело — сплошная среда». Особое внимание уделяется производству энтропии в процессе дробления и его связи с энергетическими параметрами. Предложен термодинамический критерий устойчивости частиц к дальнейшему разрушению и выведена формула для предельного размера устойчивых частиц. Важной особенностью модели является её физическая интерпретируемость и применимость к широкому классу измельчаемых материалов.

В четвёртой главе изложена кинетическая модель изменения распределения частиц по размерам в процессе измельчения. Выведено уравнение баланса, описывающее эволюцию числа частиц с учётом разрушения и образования фрагментов. Введены параметры, характеризующие разрушаемость материала, и предложена численная схема решения модели. Проведено сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными, что позволило провести проверку модели.

Пятая глава посвящена цифровой реализации модели в виде виртуального двойника, выполненного в среде Unreal Engine 5. Описана структура VR-модуля, включающего как визуализацию мельницы и измельчения, так и алгоритмы, рассчитывающие кинетические параметры в реальном времени. Рассматриваются сценарии применения цифрового двойника в образовательной и исследовательской среде. Показана возможность использования модели как обучающего инструмента, имитирующего поведение мельницы при различных режимах работы.

Приложения включают в себя исходный код комплекса программ, а также свидетельства о регистрации программ для ЭВМ и акт о внедрении результатов работы, что доказывает практическую значимость диссертационной работы Бабкина Михаила Андреевича.

Научная новизна

К числу основных научных результатов, полученных в работе Михаила Андреевича Бабкина, относятся:

1. Разработка математической модели измельчения, включающей производство энтропии как критерий эффективности процесса.
2. Формулировка аналитической зависимости устойчивого размера частиц от параметров системы, полученной на основе принципа минимума производства энтропии.
3. Построение кинетической модели дробления, основанной на балансе числа частиц с учётом фрагментации и термодинамической движущей силы.
4. Реализация цифрового представления процесса измельчения, связанного с расчётной моделью и адаптированного для задач обучения и анализа.

Достоверность полученных результатов обеспечивается строгой физико-математической формализацией моделей, основанных на принципах термодинамики и механики сплошной среды; использованием численных алгоритмов, устойчивых и проверенных на адекватность путём сопоставления с экспериментальными данными; апробацией результатов на профильных конференциях и публикациями в рецензируемых журналах.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы

Работа вносит вклад в развитие теории процессов измельчения за счёт применения аппарата механики гетерогенных сред и термодинамики необратимых процессов. Впервые предложено использование вариационного принципа минимума производства энтропии для определения устойчивого размера частиц, что позволило перейти от эмпирических описаний к физически обоснованным критериям. Построенные уравнения и критерии могут применяться при моделировании широкого класса гетерогенных систем, обеспечивая возможность анализа устойчивости, эффективности и предельных состояний процесса измельчения с точки зрения термодинамики. Разработанные численные методы решения интегро-дифференциальных уравнений расширяют инструментарий математического моделирования сложных многофазных систем.

Практическая значимость работы заключается в создании универсального инструмента анализа, прогнозирования и визуализации процессов измельчения. Разработанный программный комплекс и цифровой двойник

позволяют проводить вычислительные эксперименты, оптимизировать режимные параметры и визуализировать результаты в виртуальной среде. Предложенная модель и программные решения могут быть использованы: при проектировании оптимальных режимов работы мельниц; в составе цифровых двойников технологических процессов; в учебном процессе для изучения и демонстрации кинетики дробления; в системах мониторинга и предсказания эффективности измельчения в условиях реального производства.

Рекомендации по использованию результатов

Результаты диссертационной работы рекомендуется использовать при проектировании и оптимизации процессов измельчения в планетарных и других типах мельниц, в том числе для выбора рациональных режимных параметров и снижения энергозатрат. Разработанный программный комплекс и цифровой двойник могут быть применены в качестве инструмента анализа и прогнозирования в научно-исследовательских лабораториях и промышленных предприятиях. Математические модели и программный комплекс рекомендуется внедрять в научно-исследовательских центрах и проектных бюро горно-обогатительного и химического профилей для проведения вычислительных экспериментов, разработки регламентов работы мельниц и построения систем предиктивного управления.

Замечания

Приведенные ниже замечания касаются методики изложения и оформления работы:

1. Следовало бы привести сведения о временных затратах на проведение численных расчётов, так как для математических моделей важна не только точность, но и вычислительная эффективность. Указание времени, необходимого для выполнения расчётов при различных параметрах задачи, позволило бы объективно оценить применимость предложенной модели в системах реального времени и определить её потенциал для промышленной и образовательной практики.

2. Отсутствие сравнения с DEM: в работе сказано об ограничениях методов DEM, но не проводится количественное сравнение производительности предложенной модели (например, по точности, вычислительной эффективности) с подобными методами. Такое сравнение подчеркнуло бы преимущества модели. Следовало бы также уточнить степень верификации разработанных моделей на независимых экспериментальных

данных и более детально показать границы применимости предложенного подхода.

3. Представленные модели и цифровой двойник убедительно демонстрируют эффективность в лабораторных условиях, однако не раскрыто, в какой мере они применимы к промышленным системам с большими объемами измельчаемого материала и какими ограничениями будет сопровождаться их внедрение в реальное производство.

Указанные замечания являются рекомендациями к улучшению работы и никак не снижают положительную оценку диссертационной работы.

Соответствие диссертации предъявленным требованиям

По тематике, методам исследования диссертация соответствует паспорту научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, включая следующие направления исследований:

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

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

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

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

Заключение

Диссертация Бабкина М.А. представляет собой комплексное исследование, в котором объединены экспериментальное исследование, термодинамическое обоснование процессов дробления и разработка комплекса программ. Работа отвечает на ключевые вопросы: каким образом энергетические параметры измельчения определяют устойчивость и кинетику дробления, и как эти связи можно использовать для управления процессом. Предложенная модель, включающая термодинамический критерий минимума производства энтропии и уравнение баланса числа частиц, проверена на

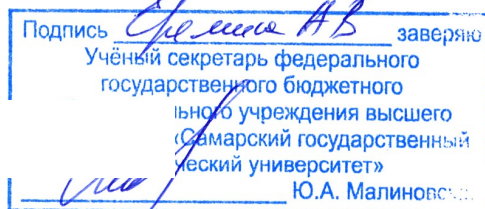
реальных данных; цифровой двойник обеспечивает интерактивную платформу для анализа и обучения. Итоговые результаты дают основу для дальнейшей оптимизации промышленных процессов измельчения и расширения применения VR-технологий в инженерном образовании.

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.

Заведующий кафедрой
«Промышленная теплоэнергетика»
доктор технических наук, доцент

Еремин Антон Владимирович

Подпись, должность, ученую степень
А.В. Еремина заверяю



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет»

Адрес: 443100, Самарская область, город Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244

Рабочий e-mail, рабочий телефон: eremin.av@samgtu.ru, +79

197