



«УТВЕРЖДАЮ»

И. о. ректора РХТУ им. Д. И. Менделеева,
д.х.н., профессор Е. В. Румянцев

11 ЮНЯ

2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация на тему: «Разработка математической модели и цифрового двойника процессов измельчения в планетарной мельнице» по научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ на соискание ученой степени кандидата технических наук выполнена на кафедре информационных компьютерных технологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева».

В процессе подготовки диссертации Бабкин Михаил Андреевич, «20» января 1997 года рождения, был аспирантом кафедры информационных компьютерных технологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева» с 01.09.2020 г. по 31.08.2024 г. В настоящее время является соискателем ученой степени кандидата наук в РХТУ им. Д.И. Менделеева на кафедре информационных компьютерных технологий с 01 октября 2024 г. по 30 сентября 2025 г.

С 2023 года Бабкин М.А. работает в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», в настоящее время – в должности ассистента кафедры информационных компьютерных технологий.

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» в 2025 году.

Научный руководитель – доктор технических наук по специальности 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий, профессор, заведующий кафедрой информационных компьютерных технологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева» Кольцова Элеонора Моисеевна.

По результатам рассмотрения диссертации на тему: «Разработка математической модели и цифрового двойника процессов измельчения в планетарной мельнице» принято следующее заключение.

Диссертационная работа Бабкина Михаила Андреевича посвящена исследованию процессов измельчения, играющих ключевую роль в производстве наноматериалов, тонкодисперсных порошков, фармацевтических препаратов, керамики, пигментов, катализаторов и аккумуляторов. Современные требования к однородности и качеству продукции обуславливают необходимость точного управления этими процессами. Особое внимание в работе уделено планетарным мельницам — одному из наиболее энергоэффективных и универсальных типов оборудования для сверхтонкого измельчения, обеспечивающих экстремально высокую кинетическую энергию взаимодействующих тел.

Несмотря на широкое применение, процессы, протекающие внутри планетарных мельниц, остаются трудными для описания в силу их многофазной природы, нелинейной кинетики разрушения и сложности взаимодействий между частицами. Существующие методы моделирования, включая уравнения популяционного баланса (PBM), метод моментов и метод дискретных элементов (DEM), обладают как преимуществами, так и существенными ограничениями. В частности, DEM требует значительных вычислительных ресурсов, а PBM требует априорного задания эмпирических функций дробления, что снижает универсальность моделей.

Научная новизна заключается в следующем.

Получены структуры термодинамических потока и движущей силы измельчения, отличающаяся применением термодинамического подхода.

Предложена методика определения функциональной зависимости диаметра частиц, отличающаяся применением вариационного принципа минимума производства энтропии в качестве критерия термодинамической устойчивости гетерогенных систем, что позволяет определить диаметр частиц, устойчивых к дроблению, от режимных параметров.

Найдена функциональная зависимость «константы» дробления, отличающаяся применением термодинамического подхода, что позволяет отказаться от эмпирических зависимостей.

Разработана оригинальная разностная схема решения интегро-дифференциального уравнения баланса числа частиц с учётом явления дробления, отличающаяся применением метода дробных шагов, что позволяет описывать процесс с высокой степенью аппроксимации.

Разработан цифровой двойник планетарной мельницы, отличающийся встроенной математической моделью кинетики измельчения, что обеспечивает возможность обучения и проведения вычислительных экспериментов в виртуальной реальности.

Практическая и теоретическая значимость работы. На основании экспериментальных исследований процессов измельчения оксида алюминия определены ключевые кинетические параметры, характеризующие кинетику разрушения частиц в планетарной мельнице. Получены количественные данные о влиянии начального размера частиц, соотношения массы шаров к массе порошка и диаметра мелющих тел на скорость достижения устойчивого размера.

На основе разработанной математической модели, включающей уравнение баланса числа частиц с физически обоснованными функциями разрушения и распределения дочерних фрагментов, сформулированы критерии выбора оптимальных режимов измельчения для достижения заданных характеристик порошка.

На основе полученной функциональной зависимости для диаметра частиц, устойчивых к дроблению определены режимы процесса измельчения для получения частиц с заданными размерами (от 0,8 до 2 мкм).

Так для получения порошка оксида алюминия (для керамоматричных композитов) с предельным размером 1,5 мкм, режимы измельчения, следующие: размер мелющих шаров – 1 мм, соотношение масс мелющих тел с измельчаемому порошку 3:1.

Реализован программный комплекс для решения уравнений математической модели процесса измельчения на языке Python с возможностью интеграции машинного обучения для уточнения энергетических характеристик измельчения. Построен цифровой двойник процесса, реализованный в среде Unreal Engine 5, обеспечивающий визуализацию кинетики измельчения в реальном времени и использование модели в формате виртуального обучающего модуля. Практическое значение работы заключается в возможности применения разработанной модели и программного комплекса как в промышленной оптимизации режимов измельчения, так и в образовательной подготовке специалистов в области процессов и аппаратов химических технологий.

Получены акты о внедрении: программного обеспечения для моделирования процессов измельчения порошков в планетарных мельницах в НИЦ «Курчатовский институт»; результатов диссертационной работы в учебном процессе по программе бакалавриата «Химическая технология» на кафедре химической технологии керамики и огнеупоров РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Работа характеризуется логичностью построения, аргументированностью основных научных положений и выводов, четкостью изложения.

Основные положения диссертации получили полное отражение в 8 работах, из них 3 статьи в изданиях, индексируемых в международных реферативных базах данных и системах цитирования Web of Sciences и Scopus. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Результаты диссертационной работы были представлены на международных и всероссийских конференциях, в том числе на: XXXVI Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы современной науки и образования» (г. Пенза, 2024 г.); Международных конгрессах молодых ученых по химии и химической технологии (г. Москва, 2018 г., 2019 г., 2020 г., 2023 г.).

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах данных:

1. Koltsova E., Babkin M.A., Popova N.A., Zhensa A.V. Mathematical modeling of the process of grinding materials // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2024. Vol. 58. No. 4. P. 1055-1063. (Web of Science, Scopus)

2. Koltsova E., **Babkin M.A.**, Mamonova N., Shaneva A., Popova N., Zharikov E. Modeling and optimization of the fabrication of Al_2O_3 -based ceramocomposites reinforced with carbon nanotubes // Materials Science Forum. 2020. Vol. 995. P. 27-33. (**Scopus**)

3. Koltsova E.M., **Babkin M.A.**, Shaneva A.S., Popova N.A., Zharikov E.V. To the question of determining the limiting particle size of corundum during grinding // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. 2020. Vol. 9. No. 2. P. 207-211. (**Scopus**)

Публичные доклады на всероссийских и международных научных мероприятиях:

1. Бабкин М.А. Применение математической модели кинетики процесса измельчения в цифровом двойнике планетарной мельницы / М.А. Бабкин, О.В. Валиева // Актуальные вопросы современной науки и образования: сборник статей XXXVI Международной научно-практической конференции, Пенза, 15 марта 2024 года. – Пенза: Наука и просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2024. – С. 11-16.

2. Бабкин М.А. Применение технологий виртуальной реальности для работы с цифровым двойником планетарной мельницы / **М.А. Бабкин**, Э.М. Кольцова, В.Н. Приходько // Успехи в химии и химической технологии. – 2023. – Т. 37, № 11 (273). – С. 57-59.

3. Бабкин М.А. Обобщение моделей измельчения оксида алюминия и карбида кремния методами машинного обучения / **М.А. Бабкин**, Э.М. Кольцова // Успехи в химии и химической технологии. – 2020. – Т. 34, № 6 (229). – С. 91-93.

4. Бабкин М.А. Моделирование кинетики процесса измельчения оксида алюминия / **М.А. Бабкин**, Н.А. Попова, Э.М. Кольцова // Успехи в химии и химической технологии. 2019. – Т. 33, № 11 (221). – С. 18-19.

5. Бабкин М.А. Разработка кинетической модели процесса дробления в планетарной мельнице / **М.А. Бабкин**, Ю.В. Терехова, Н.А. Попова, Э.М. Кольцова // Успехи в химии и химической технологии. – 2018. – Т. 32, № 11 (207). – С. 78-80.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ::

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024680829 Российская Федерация. Программный модуль цифрового двойника планетарной мельницы : № 2024669787 : заявл. 21.08.2024 : опубл. 03.09.2024 / **М.А. Бабкин**.

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018663724 Российская Федерация. Программный модуль расчёта процесса измельчения оксида алюминия в планетарной мельнице : № 2018660789 : заявл. 08.10.2018 : опубл. 02.11.2018 / Э.М. Кольцова, **М.А. Бабкин** ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева».

По тематике, методам исследования, предложенным новым научным положениям диссертация соответствует паспорту специальности научных работников 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ в части:

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.

Автореферат отражает основное содержание диссертации.

Диссертация Бабкина Михаила Андреевича является завершенной научно-квалификационной работой, содержащей результаты, полученные на основании исследований, проведенных на высоком научном и техническом уровне с применением современных методов исследования. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные автором, теоретически обоснованы и не вызывают сомнений. Представленные в работе результаты принадлежат Бабкину Михаилу Андреевичу; они оригинальны, достоверны и отличаются научной новизной и практической значимостью.

С учетом научной зрелости автора, актуальности, научной новизны и практической значимости работы, а также ее соответствия требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева», предъявляемым к подобным работам, диссертация на тему: «Разработка математической модели и цифрового двойника процессов измельчения в планетарной мельнице» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Диссертация рассмотрена на расширенном заседании кафедры информационных компьютерных технологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева», состоявшемся «29» мая 2025 года, протокол № 19.

В обсуждении приняли участие: д.т.н., профессор, заведующий кафедрой информационных компьютерных технологий Кольцова Э.М.; д.т.н., профессор кафедры химического и фармацевтического инжиниринга Гордиенко М.Г.; д.т.н., профессор кафедры кибернетики химико-технологических процессов Савицкая Т.В.; д.т.н., профессор кафедры кибернетики химико-технологических процессов Писаренко Е.В.; к.т.н., доцент кафедры информационных компьютерных

технологий Василенко В.А.; к.т.н., доцент кафедры информационных компьютерных технологий Женса А.В.; к.т.н., доцент кафедры информационных компьютерных технологий Красильников И.В.; к.т.н., доцент кафедры информационных компьютерных технологий Митричев И.И.; к.т.н., доцент кафедры информационных компьютерных технологий Филиппова Е.Б.; к.т.н., доцент кафедры информационных компьютерных технологий Зубов Д.В.; к.т.н., старший преподаватель кафедры информационных компьютерных технологий Шанева А.С.; старший преподаватель кафедры информационных компьютерных технологий Васецкий А.М.; старший преподаватель кафедры информационных компьютерных технологий Скичко Е.А.; старший преподаватель кафедры информационных компьютерных технологий Лебедев Д.А.; старший преподаватель кафедры информационных компьютерных технологий Пысин М.Д.; ассистент кафедры информационных компьютерных технологий Лобанов А.В.

Принимало участие в голосовании 11 человек. Результаты голосования: «За» – 11 человек, «Против» – 0 человек, воздержались – 0 человек, протокол № 19 от «29» мая 2025 г.

Председатель заседания

Заместитель заведующего кафедрой
информационных компьютерных технологий,
к.т.н., доцент

А. В. Женса

Секретарь заседания

доцент кафедры
информационных компьютерных технологий
к.т.н., доцент

Е. Б. Филиппова