

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА

РХТУ.2.6.10 РХТУ им. Д.И. Менделеева

по диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

аттестационное дело № 27/25

решение диссертационного совета

от 19 сентября 2025 г. № 2

О присуждении ученой степени кандидата технических наук Бабкина Михаила Андреевича, представившего диссертационную работу 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, принята к защите 19 июня 2025г., протокол № 1 диссертационным советом РХТУ.2.6.10 РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Состав диссертационного совета утвержден в количестве 18 человек приказом ректора РХТУ им. Д.И. Менделеева № 90ОД от «25» мая 2025 г.

Соискатель Бабкин Михаил Андреевич 1997 года рождения, в 2020 году с отличием окончил магистратуру в ФГБОУ ВО «Российский Химико-Технологический Университет имени Д.И. Менделеева» диплом серия 107718 номер 1137827, направление подготовки 09.04.02 Информационные системы и технологии.

В 2024 году окончил аспирантуру в ФГБОУ ВО «Российский Химико-Технологический Университет имени Д.И. Менделеева» диплом серия 107734 номер 0245675, направление подготовки 09.06.01 Информатика и вычислительная техника.

Соискатель работает старшим лаборантом и ассистентом в ФГБОУ ВО «Российский Химико-Технологический Университет имени Д.И. Менделеева».

Диссертация выполнена на кафедре информационных компьютерных технологий в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования (ФГБОУ ВО) РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Научный руководитель – профессор, доктор технических наук **Кольцова Элеонора Моисеевна**.

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, доцент **Еремин Антон Владимирович**, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Самарский государственный технический университет", заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика».

Доктор технических наук, профессор **Бобков Владимир Иванович**, Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего

образования «Национальный исследовательский университет "МЭИ" в г. Смоленске, профессор кафедры «Электроники и Микропроцессорной Техники».

Ведущая организация – **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт программных систем им. А.К. Айламазяна Российской академии наук (ИПС им. А.К. Айламазяна РАН)**

Основные положения и выводы диссертационного исследования в полной мере изложены в 8 научных работах, опубликованных соискателем, в том числе в 3 публикациях в изданиях, индексируемых в международных базах данных.

Результаты работы апробированы на 5 международных научных конференциях. Личный вклад соискателя в работах, выполненных в соавторстве, составляет 60-75% и заключается в непосредственном участии в планировании работ, разработке программных модулей, проведении моделирования процесса измельчения, разработке цифрового двойника, написании алгоритмов и программ для расчетов, обсуждении полученных результатов и написании текста работ.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

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**)
4. 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.
5. 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.
6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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».

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. **Отзыв официального оппонента** – доктора технических наук по научной специальности 05.13.18, Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, доцента, заведующего кафедрой "Промышленная теплоэнергетика" федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Самарский государственный технический университет" **Еремина Антона Владимировича**. В отзыве отмечены актуальность, научная новизна и практическая значимость работы, а также достоверность полученных данных и общий обзор работы. Отзыв положительный. Замечания по работе:

1. Следует привести сведения о временных затратах на проведение численных расчетов, поскольку для математических моделей важна не только точность, но и вычислительная эффективность. Указание времени, необходимого для выполнения расчетов при различных параметрах задачи, позволит объективно оценить применимость предложенной модели в системах реального времени и определить ее потенциал для промышленной и образовательной практики.

2. Отсутствие сравнения с DEM: в работе говорится об ограничениях методов DEM, но не приводится количественного сравнения производительности предложенной модели (например, по точности, вычислительной эффективности) с аналогичными методами.

Такое сравнение подчеркнет преимущества модели. Необходимо также уточнить степень верификации разработанных моделей на независимых экспериментальных данных и более подробно описать границы применимости предложенного подхода.

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

Указанные замечания носят рекомендательный характер и никоим образом не снижают положительную оценку диссертационной работы.

Диссертация Бабкина М.А. представляет собой комплексное исследование, объединяющее экспериментальные исследования, термодинамическое обоснование процессов дробления и разработку программного комплекса. Работа отвечает на ключевые вопросы: каким образом энергетические параметры измельчения влияют на устойчивость и кинетику процесса дробления, и как эти взаимосвязи можно использовать для управления данным процессом. Предложенная модель, основанная на термодинамическом критерии минимизации производства энтропии и уравнении баланса количества частиц, была проверена на реальных данных; разработанный цифровой двойник обеспечивает интерактивную платформу для анализа и обучения. Полученные результаты создают базу для дальнейшего совершенствования промышленных процессов измельчения и расширения применения виртуальной реальности (VR) в инженерном образовании.

Данная диссертация полностью удовлетворяет требованиям, установленным для кандидатских диссертаций в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», согласно приказу исполняющего обязанности ректора РХТУ им. Д.И. Менделеева № 103-ОД от 14 сентября 2023 года. Автор работы, Бабкин Михаил Андреевич, достоин присвоения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

2. **Отзыв официального оппонента** – доктора технических наук по научной специальности 05.13.01, Системный анализ, управление и обработка информации, профессор кафедры "Электроники и Микропроцессорной техники" Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ" в г. Смоленске, **Бобкова Владимира Ивановича**. В отзыве отмечены актуальность, научная новизна и практическая значимость работы, а также достоверность полученных данных и общий обзор работы.

Отзыв положительный. Замечания по работе:

1. В разделе, посвященном цифровому двойнику, отсутствует количественная оценка его воздействия на образовательный процесс. Нет сравнительных данных, демонстрирующих преимущество виртуального обучения перед традиционным методом.

2. В диссертации описан расчет удельной мощности на измельчение ( $\epsilon$ ), используемый в модели, однако конкретные численные значения не представлены, что затрудняет оценку прогнозируемой моделью энергоэффективности.

3. В тексте имеются отдельные неточности и двусмысленности обозначений.

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

Представленная диссертация полностью соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, установленным в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» согласно Положению о порядке присуждения ученых степеней, утвержденному приказом исполняющего обязанности ректора РХТУ им. Д.И. Менделеева № 103-ОД от 14 сентября 2023 года. Автор работы, Бабкин Михаил Андреевич, заслуженно претендует на получение ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

3. Отзыв ведущей организации - **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт программных систем им. А.К. Айламазяна Российской академии наук (ИПС им. А.К. Айламазяна РАН)**. В отзыве отмечены актуальность, научная новизна и практическая значимость работы, а также достоверность полученных данных и общий обзор работы. Отзыв положительный. Имеются следующие вопросы и замечания:

1. Желательно было бы выписать в одном месте уравнения термодинамических балансов процесса по энергии, по веществу и по энтропии (стр. 63). В последнее из них войдет производство энтропии в системе. Оно связано с критерием эффективности обычно монотонно. Найдя минимум производства энтропии по управляющим переменным, можно оценить возможности системы.

2. Желательно было бы построить зависимость предельной производительности от расхода энергии (область реализуемости мельницы) при ограничениях на распределение размеров частиц (раздел 3.7).

3. Оформление работы страдает небрежностью. В качестве примеров можно привести следующие пункты:

А) В формуле (1.8) на стр.37 ничего не сказано о том, что представляют собой входящие в нее переменные  $U$  и  $\gamma$ .

Б) На стр.63 в тексте  $r$  число фаз, а в других местах это радиус частиц.

В) В формула (3.3) совершенно непонятно, что такое  $d_1u_1/dt$ ,  $d_2u_2/dt$ ? Чем эти производные отличаются от  $du_1/dt$ ,  $du_2/dt$ ?

В целом, указанные замечания носят частный характер и не влияют на положительную оценку диссертационной работы.

Диссертация Михаила Андреевича Бабкина представляет собой законченное исследование. В нем к процессам измельчения последовательно использован термодинамический подход, найдено производство энтропии и применен принцип минимума производства энтропии. Построена новая модель процессов. Диссертацию было бы полезно издать в форме монографии, исправив те замечания, которые касались ее оформления, но не содержания.

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.

**4. Отзыв на автореферат** доктора технических наук, заведующего кафедрой «Процессов и аппаратов» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)» **Флисюка Олега Михайловича. Отзыв положительный.** Имеются следующие вопросы и замечания:

1. В формуле (3), определяющей движущую силу дробления, первое слагаемое имеет размерность Дж, а какое значение имеет размерность второго слагаемого?

2. Формула (8) для расчета мощности на измельчение не учитывает степень заполнения мельницы материалом. Например, при неизменных значениях параметров  $z_1$  и  $z_2$ , степень заполнения мельницы может различаться, следовательно, должна меняться и требуемая мощность.

3. В тексте автореферата присутствуют небольшие ошибки.

Эти замечания не оказывают существенного влияния на итоговую положительную



оценку представленной работы.

Согласно тематике, содержанию и использованным методам исследований, данная диссертация соответствует паспортной характеристике специальности 1.2.2 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Анализируя автореферат, можно сделать вывод, что диссертация Бабкина Михаила Андреевича является завершённой квалификационной научной работой, соответствующей актуальным требованиям п.9 Постановления Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года относительно требований к кандидатским диссертациям. Таким образом, её автор, Бабкин Михаил Андреевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по указанной специальности.

**5. Отзыв на автореферат** кандидата технических наук, доцента кафедры «Промышленная электроника» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» **Шутенкова Александра Васильевича. Отзыв положительный.** Имеются следующие вопросы и 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.

**6. Отзыв на автореферат** кандидата технических наук, Научного сотрудника лаборатории физико-химического анализа керамических материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук» **Марианны Геннадьевны Фроловой. Отзыв положительный.** Имеются следующие вопросы и замечания:

1. Не отражено влияние свойств среды (этанол) на термодинамические параметры измельчения - удельную мощность, поверхностную энергию, режим измельчения и проч.

2. Неполное варьирование параметров: в автореферате упоминается изменение размеров шаров (2 мм, 5 мм) и соотношение массы шаров к порошку (3:1, 5:1), но не объясняется, почему другие параметры (например, время измельчения, скорость вращения барабанов, материал мелющих тел, ПАВ) не варьировались.

**7. Отзыв на автореферат** доктора физико-математических наук, главного научного

сотрудника лаборатории механики многофазных систем Института механики им. Р.Р. Мавлютова Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук **Болотновой Раисы Хакимовны**. Отзыв положительный. Имеются следующие вопросы и замечания:

1. Не пояснено, каким образом был проведён подбор функции распределения дочерних частиц (уравнение 12). Неясна чувствительность модели к выбору этой функции и её влияние на точность расчётов.

2. Недостаточное описание условий экспериментов. В автореферате описаны опыты по измельчению  $Al_2O_3$ , 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.

**8. Отзыв на автореферат** доктора физико-математических наук, профессора, начальника управления организации научно-исследовательской и инновационной деятельности, заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика» ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», **Капановой Анны Борисовны**. Отзыв положительный. Имеются следующие замечания:

1. Зависимость среднего размера частиц от времени дробления для четырёх экспериментов на рис. 1 носит дискретный характер, в связи с чем более корректно было бы использовать диаграммное или точечное представление с соответствующей аппроксимацией.

2. Критерий минимума для размера частиц при их дроблении согласно выражению (9) сформирован с учетом экспериментальных значений диаметров частиц и фактора мощности. Проводилась ли сравнительная оценка эффекта разрушения частиц по интегральным характеристикам процесса измельчения (например, производительности аппарата)?

**9. Отзыв на автореферат** доктора технических наук, заведующего кафедрой «Химия и Химические технологии», федерального бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тамбовский Государственный технический университет» **Рухова Артёма Викторовича**. Отзыв положительный. К работе имеется ряд следующих вопросов и замечаний:

1. В производстве органических пигментов преимущественно применяют дезинтеграторы, дезмембраторы и шаровые мельницы. Применима ли разработанная математическая модель для технологического расчета и оптимизации работы данных измельчителей?

2. Какой физический смысл и размерность движущей силы процесса измельчения?



3. Сравнение экспериментальных и расчетных данных по размеру частиц устойчивых к дроблению, представленные в табл. 2 на 12 стр. автореферата, проводилось для тех же данных, что использовались для получения коэффициентов регрессионной зависимости (8) на 11 стр. автореферата?

4. Проводилась ли постановка задачи оптимизации работы планетарной мельницы? Если да, то какие ограничения типа неравенств использовались?

5. Как объяснить расчётную плотность распределения частиц, представленную на рис. 4 на 16 стр. автореферата кривая 1, если начальный средний размер был 35 мкм?

**10. Отзыв на автореферат** доктора физико-математических наук, профессора, заведующего кафедрой «Высшей и прикладной математики» ФГБОУ ВО "Ивановский Государственный Химико-Технологический Университет" **Зуевой Галины Альбертовны**. Отзыв положительный. Имеются следующие вопросы и замечания:

1. Отсутствие статистического анализа. В разделе, содержащем экспериментальные данные (в частности, Таблица 1), не приведены статистические показатели, такие как стандартное отклонение, доверительные интервалы. Это затрудняет объективную оценку воспроизводимости результатов и достоверности приведённых средних значений.

2. Отсутствие анализа чувствительности. В автореферате не представлена информация о проведённом анализе чувствительности модели. Не исследовано, как вариации входных параметров (например, начального распределения частиц или феноменологических коэффициентов) влияют на выходные характеристики, такие как устойчивый размер частиц. Это снижает прозрачность модели и ограничивает возможности её адаптации к другим материалам или условиям.

На все замечания Бабкиным Михаилом Андреевичем даны полные и исчерпывающие ответы.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается компетентностью, достижениями в научных исследованиях с близкой тематикой, наличием у оппонентов и ведущей организации публикаций в рецензируемых журналах и их высоким профессиональным уровнем.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

***разработана и апробирована*** математическая модель процесса измельчения, параметры которой получены на основе методов термодинамики необратимых процессов и отражают физико-химическую сущность процессов измельчения;

***предложена*** для решения интегро-дифференциального уравнения баланса числа

частиц разностная схема расщепления, позволяющая достичь второго порядка аппроксимации по переменным: времени, размеру;

**предложена** на основании применения вариационного принципа минимума производства энтропии методика для определения размера частиц устойчивых к дроблению от режимных параметров;

**разработаны** алгоритмическое обеспечение, архитектура, комплекс программ, которые вносят важный вклад в методику компьютерного моделирования процессов измельчения частиц в планетарной мельнице.

Диссертационный отмечает, разработанная математическая модель процесса измельчения, основанная на методах механики гетерогенных сред и неравновесной термодинамики, является развитием работ научной школы академика РАН, д.ф.-м.н., профессора Нигматулина Р.И.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

**изучен** процесс измельчения с применением методов механики гетерогенных сред и термодинамики необратимых процессов;

**определены** структура термодинамической движущей силы и термодинамического потока измельчения;

**раскрыта** на основе определения структуры потока измельчения функциональная зависимость кинетического параметра измельчения, отражающая физико-химическую сущность процесса измельчения;

**показана** взаимосвязь кинетического параметра измельчения с критерием дробления Вебера;

**проведена** модернизация расчёта интегродифференциального уравнения баланса числа частиц с применением, выведенных потока и движущей силы дробления;

**применён** критерий термодинамической устойчивости (принцип минимума производства энтропии) к гетерогенным системам для определения диаметра частиц, устойчивых к дроблению для любых устройств дробления;

**разработан** программный комплекс для моделирования процесса измельчения в планетарной мельнице, позволяющий отслеживать изменение среднего размера частиц и их распределение по размерам во времени;

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

**разработан** цифровой двойник планетарной мельницы с применением математической модели кинетики процесса измельчения в качестве виртуального датчика;

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

**определены** режимы измельчения для получения частиц специальных функциональных композиционных материалов, входящих в керамоматричные композиты с высокой прочностью на изгиб и низким показателем пористости;

**разработан** цифровой двойник планетарной мельницы, который может быть использован в качестве тренажёра для обучения технического персонала;

**внедрены** разработанные программные средства в учебный процесс на кафедре «Химической технологии керамики и огнеупоров» в РХТУ им. Д.И. Менделеева;

**применены** методы машинного обучения для определения зависимости мощности на измельчение на основе данных о частицах, устойчивых к дроблению;

**определены** кинетические параметры процесса измельчения, которые могут быть использованы при разработке структуры специальных функциональных материалов;

**получены** свидетельство о регистрации программ для ЭВМ № 2024680829 на программный модуль цифрового двойника планетарной мельницы и свидетельство о регистрации программ для ЭВМ № 2018663724 на программный модуль расчёта процесса измельчения оксида алюминия в планетарной мельнице.

**Оценка достоверности результатов исследования обусловлена:**

**использованием** метода лазерной дифракционной гранулометрии для определения распределения частиц по размерам для экспериментально полученных образцов;

**проверкой** адекватности разработанных математических моделей на результатах экспериментальных исследований.

**оперированием** известными термодинамическими законами и зависимостями широко применяемых в научной среде для описания многофазных процессов.

**Личный вклад соискателя состоит** в участии на всех этапах научного исследования: в проведении исследования по изучению экспериментальных зависимостей процесса измельчения порошка оксида алюминия в планетарной мельнице, в участии в выводе структуры термодинамических движущих сил и потоков. Автор принимал участие в выводе зависимости для частиц устойчивых к дроблению на основе вариационного принципа минимума производства энтропии. Автор разработал математическую модель процесса измельчения с учётом кинетических характеристик, основанных на фундаментальных физических принципах, использовал методы машинного обучения для определения мощности на измельчение частиц, разработал программное обеспечение на языке Python для

моделирования процесса измельчения в планетарной мельнице, создал цифровой двойник планетарной мельницы с использованием программного обеспечения с открытым исходным кодом (Unreal Engine 5, Blender) на примере измельчения порошка оксида алюминия, для обучения и проведения вычислительных экспериментов в виртуальной среде. Автор разработал собственное программное обеспечение, зарегистрированное в Федеральной службе по интеллектуальной собственности Российской Федерации.

Диссертационная работа выполнялась при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-07-00886, а также при поддержке «Фонда содействия инноваций» по программе «УМНИК-2023» по договору № 18696ГУ/2023.

**Работа соответствует паспорту научной специальности 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».

**Диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертационная работа Бабкина М.А. на тему "Разработка математической модели процесса измельчения и цифрового двойника планетарной мельницы" является законченной, самостоятельно выполненной научно-квалификационной работой, которая представляет собой совокупность научно-обоснованных решений по разработке математических моделей процессов измельчения и реализующего их программного обеспечения, которые имеют существенное значение для развития экономики Российской Федерации в результате применения специальных функциональных керамических материалов с требуемыми характеристиками.**

Диссертационный совет отмечает: диссертационная работа Бабкина М.А. вносит определенный вклад в развитие компьютерного моделирования и применения современных компьютерных технологий для построения цифровых двойников.

По актуальности, научной новизне, теоретической и практической значимости диссертационная работа Бабкина М.А. на тему «Разработка математической модели и цифрового двойника процессов измельчения в планетарной мельнице» полностью соответствует пунктам Положения о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева», утвержденного приказом и.о. ректора РХТУ им. Д.И. Менделеева от 14.09.2023 г. № 103 ОД.

На заседании диссертационного совета РХТУ.2.6.10 РХТУ им. Д.И. Менделеева 19 сентября 2025 года принято решение о присуждении ученой степени кандидата технических наук Бабкину Михаилу Андреевичу.

Присутствовало на заседании 16 членов совета,  
в том числе в режиме видеоконференции 4,  
в том числе докторов наук по научной специальности, отрасли науки рассматриваемой диссертации 9.

При проведении голосования члены диссертационного совета по вопросу присуждения ученой степени проголосовали:

Результаты тайного голосования:

«за» – 12,

«против» – нет,

«воздержались» – нет.

Проголосовали 4 члена диссертационного совета, присутствовавшие на заседании в режиме видеоконференции:

«за» – 4,

«против» – нет,

«воздержались» – нет.

#### **Итоги голосования:**

«за» – 16,

«против» – нет,

«воздержались» – нет.

Председатель диссертационного совета

Ученый секретарь диссертационного совета

Дата «19» сентября 2025 г.



академик РАН, д.т.н.,  
профессор, Мешалкин В.П.

к.т.н., доцент, Василенко В.А.