

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.150.115>

## КОМПЛЕКСНАЯ СТАНДАРТИЗАЦИЯ В РАСЧЕТАХ МЕТОДОМ ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Научная статья

Шарапов Д.А.<sup>1,\*</sup><sup>1</sup>ORCID : 0000-0001-8650-2375;<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (sharapov.dm[at]gmail.com)

**Аннотация**

В работе рассматривается анализ необходимости и актуальности стандартизации расчетов методом дискретных элементов в контексте современных научных и промышленных требований. Метод дискретных элементов (DEM) представляет собой мощный инструмент для моделирования поведения сыпучих и дискретных материалов, однако его применение сталкивается с рядом проблем, таких как нестабильность результатов при варьировании входных параметров и отсутствие единых подходов к моделированию. Это создает трудности для исследователей и практиков, затрудняя интерпретацию данных и сравнение результатов различных исследований. В работе рассматривается влияние стандартизации на улучшение качества расчетов и интеграцию вычислительных технологий и программного обеспечения для DEM. Рассматриваются проблемы, возникающие из-за отсутствия унифицированных стандартов, и подчеркивается важность создания стандартов для повышения воспроизводимости и надежности результатов. Приводятся примеры стандартизации в других отраслях, которые могут служить основой для разработки эффективных стандартов в области DEM. Основные выводы подчеркивают важность стандартизации для повышения эффективности научных исследований и производственных процессов, а также для поддержки инноваций в области моделирования дискретных материалов. В статье подчеркивается необходимость внимания к вопросам стандартизации и её влияние на развитие метода дискретных элементов, а также на улучшение взаимодействия между научным сообществом и промышленностью.

**Ключевые слова:** метод дискретных элементов, DEM, стандартизация, моделирование, устойчивость моделей, надежность.

## COMPLEX STANDARDIZATION IN DISCRETE ELEMENT METHOD CALCULATIONS

Research article

Sharapov D.A.<sup>1,\*</sup><sup>1</sup>ORCID : 0000-0001-8650-2375;<sup>1</sup> Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russian Federation

\* Corresponding author (sharapov.dm[at]gmail.com)

**Abstract**

The article examines the analysis of the necessity and relevance of standardization of discrete element method calculations in the context of modern scientific and industrial requirements. The discrete element method (DEM) is a powerful tool for modelling the behaviour of bulk and discrete materials, but its application faces a number of problems, such as the instability of results when varying input parameters and the lack of unified approaches to modelling. This creates difficulties for researchers and practitioners, making it difficult to interpret data and compare results from different studies. This paper examines the impact of standardization on improving the quality of calculations and integrating computational techniques and DEM software. The problems stemming from the lack of harmonized standards are discussed, and the importance of creating standards to improve the reproducibility and reliability of results is highlighted. Examples of standardization in other industries that can serve as a basis for developing effective DEM standards are provided. The main conclusions highlight the importance of standardization to improve the efficiency of research and manufacturing processes, and to support innovation in discrete materials modelling. The article stresses the necessity of attention to standardization issues and its impact on the development of the discrete element method, as well as on improving the interaction between academia and industry.

**Keywords:** discrete element method, DEM, standardization, modelling, model stability, reliability.

**Введение**

Метод дискретных элементов (DEM) представляет собой эффективный подход к моделированию и анализу поведения сыпучих и дискретных материалов. Он находит широкое применение в самых различных отраслях, включая горнодобывающую, строительную, сельскохозяйственную и фармацевтическую промышленности, а также в научных исследованиях. Этот метод позволяет детально изучать динамику и механическое поведение частиц, включая их взаимодействия и поведение в условиях различных внешних нагрузок и условий окружающей среды. Однако, несмотря на его значительные преимущества, применение метода DEM также связано с рядом сложностей, которые требуют комплексного подхода к стандартизации расчетов.

Одной из ключевых проблем в области применения DEM является нестабильность результатов, наблюдаемая при варьировании входных параметров. Часто исследователи сталкиваются с ситуацией, когда даже небольшие изменения в параметрах моделирования, таких как размер частиц, коэффициенты трения или параметры взаимодействия, приводят к значительным различиям в результатах. Это создает трудности для практиков, работающих с результатами

этих исследований. Нестабильность результатов может привести к недоверию к методологии, что, в свою очередь, может затруднить внедрение полученных данных в промышленную практику.

Отсутствие единых стандартов и подходов к моделированию также представляет собой серьезную проблему. Каждый исследователь или группа исследователей могут применять свои собственные методы и параметры, что делает результаты трудно сравнимыми. Это приводит к ситуации, когда различные исследования по одной и той же теме могут давать противоречивые результаты. Таким образом, для достижения согласованности и сравнимости результатов необходимо внедрение стандартов, которые обеспечивают единый подход к проведению расчетов методом DEM. DEM, как вычислительный метод, требует значительных ресурсов, особенно при моделировании больших систем, состоящих из миллионов частиц. При этом интерпретация результатов может быть сложной задачей, особенно когда речь идет о сложных взаимодействиях между частицами или многокомпонентных системах. Стандартизация в этой области может улучшить контроль качества моделей и снизить вероятность ошибок при интерпретации результатов, что критически важно для надежности и безопасности исследований и практического применения.

В условиях современного научного и технологического прогресса, требующего от специалистов все более высоких стандартов и качеств, становится очевидной необходимость внедрения стандартизации в метод DEM. Это не только улучшит воспроизводимость и надежность исследований, но и повысит эффективность разработки новых технологий и оптимизацию существующих процессов [1]. Стандартизация позволяет исследователям и инженерам сократить время на проектирование, минимизировать риски ошибок и повысить общую производительность.

Внедрение единых стандартов для расчета методом дискретных элементов способствует улучшению интеграции различных программных решений. В современном мире существует множество программных пакетов, реализующих метод DEM, и зачастую они используют различные алгоритмы и параметры для моделирования [2]. Стандартизация создает основу для совместимости этих решений, что позволяет пользователям выбирать наилучшие инструменты для решения конкретных задач и облегчает интеграцию разных программных продуктов в единую рабочую среду. Это также ускоряет процесс разработки новых технологий и методов, поскольку разработчики могут опираться на существующие стандарты и рекомендованные подходы. Разработка интуитивных интерфейсов и документации, соответствующих стандартам, облегчает обучение и использование программного обеспечения. Пользователи могут быстрее адаптироваться к новым инструментам и технологиям, что способствует более широкому внедрению метода DEM в различных отраслях.

Важным аспектом влияния стандартизации на развитие DEM является создание специализированного программного обеспечения, отвечающего потребностям конкретных отраслей и приложений. Стандарты позволяют разработать решения, которые учитывают особенности и требования конкретных секторов, таких как горнодобывающая или фармацевтическая промышленность. Это приводит к повышению качества и эффективности программного обеспечения, поскольку разработчики могут сосредоточиться на создании решений, которые максимально удовлетворяют потребности пользователей.

Актуальность стандартизации расчетов методом дискретных элементов (DEM) обусловлена растущими требованиями к точности, надежности и воспроизводимости результатов в научных и промышленных исследованиях [3]. В условиях быстро развивающихся технологий и растущей сложности процессов, связанных с моделированием дискретных материалов, становится необходимым создание единых стандартов, способствующих унификации подходов и методик.

Основной целью работы является анализ текущего состояния стандартизации расчетов методом дискретных элементов и выработка рекомендаций для ее улучшения. Для достижения цели необходимо решить задачи:

- выделить основные проблемы, с которыми сталкиваются исследователи и практики;
- оценить существующие методы моделирования и их влияние на стабильность и точность результатов;
- рассмотреть влияние варьирования входных параметров на результаты расчетов;
- рассмотреть примеры.

При подготовке работы были проанализированы ряд актуальных исследований. Статья [2] описывает моделирование взаимодействия строительных машин с сыпучими материалами с использованием DEM-кода, интегрированного с «многотеловыми» системами. Объясняется реализация интерфейса, проведены эксперименты для проверки результатов, и приведен пример применения, демонстрирующий преимущества такого моделирования. Статья [4] описывает разработку и валидацию новой 3D DEM-модели для парового реформинга метана в трубе с катализаторными частицами. Модель учитывает тепломассообмен внутри частиц и между частицами и газом, используя кинетику LHHW. Верификация с 3D-CFD моделью показала хорошие результаты с минимальными отклонениями. Работа [5] описывает исследование с использованием метода дискретных элементов (DEM) для анализа поведения порошков в Revolution Powder Analyser (RPA). Обнаружена связь между плотностью укладки порошка и его поведением при лавинообразном течении. Широкое распределение размеров частиц и несферичность порошков увеличивают подвижность порошка, вызывая более раннюю лавину. Также выявлено влияние трения, скорости вращения барабана и адгезии частиц на результаты. На основе экспериментов были получены коэффициент трения и энергия адгезии порошка.

Статья [6] посвящена исследованию новой молотильной системы для уборки кукурузы, направленной на снижение потерь зерен. В работе анализируются параметры конструкции нового молотильного элемента с помощью модели на основе метода дискретных элементов. Результаты моделирования и эксперименты показывают, что новый элемент по сравнению с традиционным снижает процент поврежденных зерен, невыбившихся зерен и потерь. Работа [7] описывает использование метода дискретных элементов (DEM) для прогнозирования равномерности покрытия таблеток. Проведены эксперименты с различными условиями и масштабами процессов. DEM-модели показали точность с ошибкой в 0,54%. Основной источник ошибок — размер зоны распыления, но они меньше экспериментальных на крупных масштабах, подтверждая полезность DEM для проектирования процессов покрытия.

Работа [8] описывает автоматическую калибровку параметров моделей дискретных элементов (DEM) для каменных конструкций с помощью алгоритмов ИИ. Новый двухэтапный подход улучшил эффективность оптимизации, и показал лучшие результаты при моделировании обрушения арки.

Работа [9] исследует влияние сотрудничества в области стандартов на способность предприятий к стандартизации, что повышает качество продуктов и конкурентоспособность. На основе опроса 165 компаний в ИКТ-отрасли выявлена эффективность такого сотрудничества, особенно его глубины и ширины. Технологические возможности усиливают положительное влияние глубины сотрудничества. Статья [10] описывает исследование обработки почвы для улучшения работы инструментов эффективного земледелия. В лабораторном эксперименте использовался дисковый плуг для внедрения кукурузных остатков в песчаную почву, и измерялись силы резания и скорость внедрения остатков при различных длинах. Модель взаимодействия остатков, диска и почвы была разработана с использованием метода дискретных элементов (DEM). Исследование предлагает новые данные о динамике взаимодействия остатков, диска и почвы для выбора рабочих параметров. Статья [11] исследует взаимосвязь между патентованием и участием в формальной стандартизации. Рассматриваются существующие мотивации и барьеры, связанные с этими процессами. На основе литературного обзора формулируются предложения о взаимосвязи между патентованием и стандартизацией. Эмпирический анализ проводится на выборке немецких компаний, большинство из которых занимаются и патентованием, и стандартизацией. Мотивации и барьеры в обоих процессах оказались тесно связаны, и компании используют их для достижения своих целей. Также обсуждаются внутренние и внешние ресурсы, которые влияют на эти стратегии, и в конце представляются рекомендации для управления патентованием и стандартизацией.

Статья [12] описывает разработку универсальной методологии калибровки параметров для метода дискретных элементов (DEM) и усовершенствованной модели динамической компакции для мягких красных пород. Исследуется влияние веса трамбовки и высоты падения на качество динамической компакции. Выбраны линейная модель и модель параллельных связей для точного представления динамического поведения пород. Проведены DEM-симуляции и физические испытания для калибровки контактных параметров. Статья [13] описывает исследование процесса помола риса, важного для его питательной ценности и экономической эффективности. Процесс был смоделирован с использованием метода дискретных элементов (DEM) и подтвержден экспериментально. Установлено, что увеличение энергии и объемной доли частиц в зоне сдвига повышает качество помола. Впервые разработана математическая модель, связывающая структурные и операционные параметры с потерей энергии, показавшая линейную зависимость. Модель точно предсказывает степень помола риса, что может помочь в проектировании рисовых мельниц и аналогичного оборудования.

Статья [14] описывает численный подход к решению задач краевых значений с использованием обобщенных уравнений в частных производных. Исследуется применение модуля PDE в COMSOL для решения двух механических задач: прогиба тонкой пластины и напряжения в бруске при изгибе. Описывается процедура решения этих задач с использованием трех стандартных форм модуля. Результаты соответствуют данным из литературы, что подтверждает эффективность модуля PDE для решения сложных задач, для которых еще не разработаны специализированные модули конечных элементов. Исследование [15] оценивает преимущества и недостатки технических стандартов шнековых конвейеров в Китае, Германии и США. Поскольку методы определения эмпирических коэффициентов и теоретические основы диаграмм не документированы, для анализа используются численные симуляции методом дискретных элементов (DEM). На основе конструкций для горизонтальной, наклонной и вертикальной транспортировки ячменя, лигнита и песка обсуждаются влияющие факторы. Устранены отклонения, связанные с моделями частиц, и оценена точность расчета потребляемой мощности и массовых потоков. Статья [16] обсуждает управление информацией в строительстве. Упомянуто, что управление проектами делится на фазы, каждая из которых требует разного уровня информации и графической детализации. Рассматриваются международные стандарты, такие как шкала LOD (Level of Development), которая служит основой для стандартизации.

Статья [17] рассматривает проблемы оценки соответствия качества. Цель исследования — выявить тенденции в стандартизации и сертификации авиационного оборудования для гражданской авиации. Исследование основано на данных о разработке стандартов качества с начала авиационной отрасли и включает методы сравнения исторических событий, способствовавших развитию авиационных технологий. Результаты показывают тенденции в стандартизации и сертификации оборудования для гражданской авиации. Статья [18] рассматривает 3D-печать бетона как современный метод аддитивного производства в строительстве. Используя метод дискретных элементов (DEM), исследование снижает затраты на прототипирование и испытания, однако сталкивается с трудностями в калибровке параметров для строительных материалов, которые не являются типичными гранулами. Параметры DEM для раствора и его компонентов были калиброваны с использованием центрального композитного дизайна, а стандартный тест Naegertapp оценивал консистенцию раствора. Работа предлагает универсальный подход к калибровке различных строительных материалов для DEM-моделирования в E3DCP. Статья [19] обсуждает использование стандартизации для снижения выбросов углерода. Используя параметрический метод и генетические алгоритмы, исследование показывает, что этот подход снижает выбросы углерода на 10-16% по сравнению с традиционными методами. Результаты подчеркивают, что стандартизация не всегда приводит к уменьшению выбросов и предлагают стратегии, полезные для дизайнеров и производителей.

### **Методология**

Методология исследования включает рассмотрение влияния варьирования входных параметров на стабильность и точность результатов расчетов проводятся серии вычислительных экспериментов с различными наборами входных данных, чтобы выяснить, какие параметры наиболее критичны для получения надежных результатов. В рамках исследования необходимо рассмотрение внедрения стандартов в различных областях и их влияние на улучшение качества расчетов и процессов. Это может включать изучение практик в таких сферах. На основе анализа возможно появление рекомендаций по унификации подходов, созданию протоколов и методик, которые помогут повысить

воспроизводимость и надежность результатов расчетов. Рекомендации могут охватывать как теоретические аспекты, так и практические рекомендации для разработчиков программного обеспечения и исследователей. Оценивается влияние стандартов на развитие вычислительных технологий и программного обеспечения для дискретных методов.

### Анализ

Метод дискретных элементов (DEM) основан на моделировании поведения частиц, рассматриваемых как отдельные тела, взаимодействующие друг с другом посредством контактных сил. Основные этапы работы метода включают разбиение системы на отдельные элементы, вычисление сил и моментов, решение уравнений движения. Метод дискретных элементов позволяет моделировать поведение материалов с очень сложной структурой, включая те, которые сложно описать непрерывными методами, анализировать механизмы взаимодействия отдельных частиц в системах с произвольной геометрией.

Метод дискретных элементов широко используется для моделирования дробления, транспортировки и сортировки материалов в дробилках, шаровых мельницах и конвейерах, проектирования и оптимизации оборудования для обработки сыпучих материалов (руды, угля), моделирования поведения грунтов и сыпучих материалов при строительстве фундаментов, дамб и дорожных покрытий и позволяет анализировать устойчивость земляных сооружений и оценивать риски их разрушения.

Одной из ключевых проблем при применении метода дискретных элементов является нестабильность результатов при изменении входных параметров модели. Этот фактор может значительно влиять на точность моделирования и требовать особого внимания к валидации и калибровке расчетов. Некорректная калибровка параметров может привести к серьезным расхождениям между результатами численного моделирования и реальными экспериментальными данными.

Выбор временного шага играет критически важную роль, так как слишком большой шаг может привести к пропуску важных событий в контактах между частицами, что нарушит стабильность моделирования. При слишком малом шаге интегрирования существенно возрастает время расчета, но результаты могут стать более детализированными и стабильными. Использование укрупненных частиц вместо реальных может снижать точность расчетов, особенно при моделировании мелкозернистых материалов или сложных потоков.

Поскольку метод дискретных элементов работает с множеством входных параметров, то трудность заключается в их корректной калибровке. Для получения адекватных результатов необходимо, чтобы параметры модели соответствовали реальным характеристикам системы. Сложно верифицировать модели дискретных элементов, так как часто не существует экспериментальных данных, которые бы охватывали все параметры и условия моделирования. Параметры, подобранные для одной системы (например, для одного типа материалов или оборудования), могут не подходить для другой системы, что требует проведения новой калибровки.

Несмотря на широкое распространение и успешное применение метода в различных отраслях, существует серьезная проблема — **отсутствие единых стандартов** и подходов к моделированию, что приводит к ряду сложностей. Рассмотрим эту проблему более подробно.

Без общепринятых стандартов, результаты, полученные разными исследователями или организациями, могут быть трудно сравнимы. Это связано с тем, что разные группы могут использовать различные входные параметры, численные схемы, а также методы обработки и интерпретации данных. Разные исследователи могут задавать физические параметры частиц (например, коэффициенты трения, упругости, плотности) на основе собственных данных, что может привести к различным результатам даже при моделировании схожих систем. Верификация и валидация моделей дискретных элементов также не стандартизированы. Одни и те же задачи могут решаться с различными критериями точности и верификации, что затрудняет оценку качества расчетов и корректности используемых моделей. Разные программные пакеты или исследовательские группы могут использовать различные алгоритмы для определения сил взаимодействия между частицами. Эти алгоритмы могут варьироваться по сложности — от простых моделей жестких тел до более сложных, учитывающих деформации. В модели трения между частицами также могут быть заложены разные физические предположения. Одни используют модели Кулона, другие применяют более сложные модели, учитывающие динамику контакта или адгезию. Разные схемы численного интегрирования (метод Верле, метод центральных разностей и другие) могут по-разному влиять на стабильность и точность моделирования. Отсутствие стандартов в выборе временного шага и подходов к численному интегрированию приводит к различным результатам. В промышленности применение метода DEM требует высокой точности и надежности, однако отсутствие стандартов усложняет интеграцию результатов DEM в реальный производственный процесс.

Одним из главных технических ограничений метода дискретных элементов является его **высокая вычислительная стоимость**. DEM требует моделирования большого количества частиц, каждая из которых взаимодействует с другими частицами в системе, что приводит к значительному увеличению числа вычислений. Вычислительные затраты растут нелинейно с увеличением числа частиц. Для моделирования крупных систем (например, горных пород, потоков зерновых материалов или промышленных процессов) может потребоваться симуляция десятков или даже сотен миллионов частиц. Высокая вычислительная сложность приводит к длительным расчетам, особенно для систем с большим количеством частиц или сложными контактными моделями. Время моделирования может занимать от нескольких часов до нескольких недель, в зависимости от детализации и доступной вычислительной мощности. Большинство DEM моделей используют сферические или упрощенные формы частиц для снижения вычислительной нагрузки. Однако реальные материалы имеют гораздо более сложные формы, что может значительно влиять на поведение системы, особенно в задачах с высокими плотностями упаковки или в процессах трения.

Некоторые материалы и процессы трудно смоделировать с использованием DEM из-за ограничений в моделях контакта и взаимодействия частиц. Модели контакта между частицами в DEM обычно упрощаются (например, с

использованием линейных моделей упругости и демпфирования), что может не точно описывать сложные физические процессы, такие как адгезия, деформация или разрушение частиц. В реальных системах могут взаимодействовать несколько фаз (твердая, жидкая, газовая), что требует комбинирования DEM с другими численными методами, такими как метод сглаженных частиц (SPH) или метод конечных элементов (FEM). Это усложняет моделирование и требует больше вычислительных ресурсов и времени.

**Отсутствие стандартных методик калибровки** усложняет работу с моделью и приводит к трудностям при ее верификации. Разработка стандартных процедур для калибровки параметров моделей для различных типов материалов и условий поможет устранить неопределенность при выборе входных данных. Стандарты могут включать эталонные задачи или наборы экспериментальных данных, на основе которых можно будет проверять модели DEM. Это повысит достоверность результатов и сократит время на разработку и верификацию моделей. Высокая вычислительная сложность метода DEM — одна из ключевых проблем, особенно при моделировании систем с большим количеством частиц. Стандартизация расчетов может способствовать оптимизации процесса моделирования и сокращению затрат на вычислительные ресурсы. Стандартизация может регламентировать применение наиболее эффективных численных методов для различных задач, что позволит снизить время расчета без потери точности. В отсутствие стандартов результаты моделирования часто приходится пересчитывать при изменении параметров. Стандартизация может сократить количество таких пересчетов, упростив настройку модели и увеличив эффективность расчета.

Для успешного применения DEM в промышленности важно, чтобы метод был не только точным, но и **легко интегрируемым** в производственные процессы. Стандартизация помогает сделать DEM более привлекательным для бизнеса и инженерных решений.

Для успешного внедрения стандартизации в область дискретных расчетов методом дискретных элементов (DEM) необходимо **установить ряд требований**, которые обеспечат высокую точность, воспроизводимость, универсальность и удобство применения метода. Эти стандарты должны охватывать различные аспекты моделирования — от выбора параметров и численных методов до калибровки моделей и обмена данными. Рассмотрим ключевые требования к стандартам в области дискретных расчетов.

Одним из главных требований к стандартам является обеспечение высокой точности расчетов и их воспроизводимости. Для достижения этого необходимо регламентировать ключевые аспекты моделирования, чтобы разные исследовательские группы могли воспроизводить одни и те же результаты при использовании аналогичных условий. Стандарты должны четко определять параметры частиц и материалов, такие как коэффициенты трения, плотность, упругость и вязкость, которые будут использоваться в моделях. Это особенно важно для материалов, часто встречающихся в промышленности и исследованиях, таких как песок, гравий, металлы и др. Стандартизация подходов к выбору временного шага и численных методов интегрирования уравнений движения частиц (например, методом Верле или методом Ньютона) позволит обеспечить численную стабильность и воспроизводимость расчетов. Стандарты должны содержать требования к методам калибровки параметров, а также к процессу валидации модели, чтобы гарантировать достоверность расчетов. Необходимо включить стандартные тесты для валидации моделей, такие как поведение сыпучих материалов при разгрузке, движение частиц в барабане и т.д. Это позволит проверять корректность работы различных моделей и программных пакетов для расчета DEM.

Для того чтобы модели были сопоставимы и могли использоваться различными исследовательскими группами, стандарты должны регламентировать способы представления и использования параметров материалов, которые применяются в расчетах. Стандарты должны предусматривать наличие библиотек с физическими параметрами для наиболее распространенных материалов. Эти параметры должны быть доступны исследователям и промышленным пользователям для применения в расчетах. Стандарты должны предусматривать единые форматы файлов для импорта и экспорта данных, таких как параметры частиц, контактных взаимодействий и результатов моделирования. Это позволит интегрировать данные из разных программных решений и упростит их совместное использование. Для того чтобы результаты моделирования были прозрачными и понятными для других исследователей или заказчиков, стандарты должны предусматривать требования к документированию процесса расчета и формату отчетности.

**Внедрение** стандартных методов калибровки моделей для измельчения материалов (например, стандартных тестов для шаровых и роторных мельниц) позволило унифицировать подходы к расчету эффективности дробилок и мельниц. Это дало возможность более точно прогнозировать производительность оборудования и сократить энергозатраты при измельчении руды. Например, использование программы *EDEM* в горнодобывающей промышленности для стандартизированных расчетов поведения сыпучих материалов при транспортировке и измельчении привело к значительному сокращению времени на разработку новых систем транспортировки и оборудования. Введение стандартных моделей зерна с определенными физическими параметрами позволило ускорить процесс проектирования сельскохозяйственной техники, такой как зерноуборочные комбайны и оборудование для хранения зерна. Единые подходы к моделированию взаимодействий зерна при транспортировке и хранении позволили повысить производительность оборудования.

### **Заключение**

В работе рассмотрена проблема нестабильности результатов при изменении входных параметров метода дискретных элементов. Показано, что правильная калибровка и валидация параметров являются ключевыми для повышения точности моделирования. Новизной является внесение предложений по стандартизации параметров для улучшения точности и воспроизводимости результатов. Необходимость этого подтверждается исследованиями в области верификации метода дискретных элементов, например, проведенными [2], которым проводились исследования в области стабильности численного моделирования.

Показана необходимость разработки единых стандартов для метода дискретных элементов, включая параметры частиц и методы численного интегрирования. Отсутствие стандартов затрудняет сравнение и воспроизводимость

результатов. Новизной работы является предложение по системе унифицированных методик и протоколов для повышения согласованности моделей метода дискретных элементов. Похожие подходы исследованы в работах, связанных со стандартизацией механических расчетов [16], [17].

Высокая вычислительная сложность метода дискретных элементов ограничивает его применение в моделировании крупных систем. Предложены пути оптимизации, включая стандартизацию эффективных численных методов. Новым научным вкладом является анализ влияния стандартизации на сокращение времени расчетов и снижение затрат на вычислительные ресурсы. Данная проблема, включая особенности реализации расчетного алгоритма, математическая постановка, поднимались в работах [1], [2], [7], [8], где рассматривалась применительно к поставленным в работах задачам, в отличие от полученных в данной работе обобщенных методологических предложений.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Sharapov D. Evolution of ice load prediction tools for hydrotechnical construction / D. Sharapov // E3S Web of Conferences. — 2021. — 402. — P. 05023. DOI: 10.1051/e3sconf/202340205023.
2. Richter C. Coupled discrete element and multibody simulation, part I: implementation, verification and validation / C. Richter, T. Roessler, H. Otto [et al.] // Powder Technology. — 2021. — 379. — P. 494–504. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.10.074.
3. Sharapov D. Improving quality of 2D ice load estimation on frozen piles / D. Sharapov, Y. Klochkov // International Journal for Quality Research. — 2023. — 17(4). — P. 1141–1150. DOI: 10.24874/IJQR17.04-11.
4. Lu Y.L. DEM-based model for steam methane reforming / Y.L. Lu, P.A. Nikrityuk // Chemical Engineering Science. — 2020. — 247. — P. 116903. DOI: 10.1016/j.ces.2021.116903.
5. Dai L. Discrete element simulation of powder flow in revolution powder analyser: Effects of shape factor, friction and adhesion / L. Dai, Y.R. Chan, G. Vastola [et al.] // Powder Technology. — 2022. — 408. — P. 117790. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.117790.
6. Dong J. Development of a low-damage maize threshing system based on discrete element technology to effectively improve maize harvest quality and yield / J. Dong, T. Cui, D. Zhang [et al.] // Powder Technology. — 2024. — 448. — P. 120297. DOI: 10.1016/j.powtec.2024.120297.
7. Sivanesapillai R. A validation of discrete-element model simulations for predicting tablet coating variability / R. Sivanesapillai, A. Ehrig, L.W. Nogueira [et al.] // International Journal of Pharmaceutics. — 2023. — 642. — P. 123109. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2023.123109.
8. Kibriya G. Automatic calibration of a discrete element model of a masonry arch by swarm intelligence methods / G. Kibriya, J. Botzheim, A. Orosz [et al.] // Computers & Structures. — 2024. — 299. — P. 107401. DOI: 10.1016/j.compstruc.2024.107401.
9. Kibriya G. Automatic calibration of a discrete element model of a masonry arch by swarm intelligence methods / G. Kibriya, J. Botzheim, A. Orosz [et al.] // Computers & Structures. — 2024. — 299. — P. 107401. DOI: 10.1016/j.compstruc.2024.107401.
10. Wu P. Discrete element modelling of the effect of disc angle and tilt angle on residue incorporation resulting from a concave disc / P. Wu, Y. Chen // Computers and Electronics in Agriculture. — 2024. — 224. — P. 109222. DOI: 10.1016/j.compag.2024.109222.
11. Blind K. Patenting and standardization: Similarities and differences based on firms' strategic motives and experienced barriers / K. Blind, J. Pohlisch, J. Rauber // Journal of Engineering and Technology Management. — 2022. — 65. — P. 101699. DOI: 10.1016/j.jengtecman.2022.101699.
12. Li X. A generalizable parameter calibration framework for discrete element method and application in the compaction of red-bed soft rocks / X. Li, X. Xiao, K. Xie [et al.] // Construction and Building Materials. — 2024. — 444. — P. 137734. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137734.
13. Li A. Study on dynamic response mechanism of rice grains in friction rice mill and scale-up approach of parameter based on discrete element method / A. Li, F. Jia, Y. Han [et al.] // Innovative Food Science & Emerging Technologies. — 2023. — 86. — P. 103346. DOI: 10.1016/j.ifset.2023.103346.
14. Wang N. PDE Standardization Analysis and Solution of Typical Mechanics Problems / N. Wang, Y. Wang, Y. Pei [et al.] // CMES – Computer Modeling in Engineering and Sciences. — 2024. — 141(1). — P. 171–186. DOI: 10.32604/cmes.2024.053520.
15. Tan Y. A comparative study on design standards of screw conveyors in China, Germany, and the USA – Part II: Discrete element method / Y. Tan, M. Rackl, W. Yang [et al.] // Particuology. — 2024. — 92. — P. 113–125. DOI: 10.1016/j.partic.2024.04.014.
16. Cassano M. LOD Standardization for Construction Site Elements / M. Cassano, M.L. Trani // Procedia Engineering. — 2017. — 196. — P. 1057–1064. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.08.062.

17. Ryapukhin A.V. Trends in the Development of Standardization and Certification of Aviation Equipment / A.V. Ryapukhin // *Transportation Research Procedia*. — 2023. — 68. — P. 183–190. DOI: 10.1016/j.trpro.2023.02.024.
18. Dahlenburg M. A flexible and efficient calibration method for discrete element simulations of additive manufacturing in construction / M. Dahlenburg, Y. Tan, M. Li [et al.] // *Journal of Building Engineering*. — 2024. — 96. — P. 110398. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.110398.
19. Xiang Y. Design optimisation towards lower embodied carbon of prefabricated buildings: Balancing standardisation and customisation / Y. Xiang, A. Mahamadu, L. Florez-Perez [et al.] // *Developments in the Built Environment*. — 2024. — 18. — P. 100413. DOI: 10.1016/j.dibe.2024.100413.