ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ И МОЩНОСТИ В ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ DEM И СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА

Акмал Жуманазаров
соискатель Навоиского государственного горно-металлургического университета, PhD по техническим наукам, эл.почта: ar.jumanazarov@gmail.com
Илхом Эгамбердиев
заведующий кафедры "Локализация производственных процессов" Навоиского государственного горно-металлургического университета, доктор технических наук, профессор, эл.почта: Ilkhom1997@mail.ru, +998936124560
Элбек Очилов
ассистент кафедры "Инженерная механика" Навоиского государственного горно-металлургического университета, elbekoch@mail.ru, +998905012142
Улугбек Очилов
докторант кафедры "Технология машиностроения" Навоиского государственного горно-металлургического университета, эл.почта: ulugbek_ochilov94@mail.ru, +998915495655

Аннотация:В работе исследованы внутренние механические взаимодействия в шаровой мельнице методом дискретных элементов (DEM). Проанализированы контактные силы и распределение энергии: сдвиговая, ударная и рассеиваемая. Установлено, что сдвиговая мощность играет ключевую роль в передаче энергии, указывая на выраженный абразивный характер взаимодействий. Результаты полезны для оптимизации конструкции мельницы и снижения энергетических потерь.

Ключевые слова: шаровая мельница, DEM, сдвиговая мощность, контактные силы, распределение энергии.

Аннотация:Ушбу тадқиқотда шарли мельницанинг ички механик таъсирлари дискрет элементлар усули (DEM) ёрдамида ўрганилди. Контакт кучларининг ўзгариши ва энергия компонентларининг — сдвиг кучлари, зарба қуввати ва тарқалган энергия - тақсимоти таҳлил қилинди. Натижалар сдвиг қуввати асосий энергия манбаси эканлигини ва абразив таъсир кучли эканини кўрсатди. Бу маълумотлар мельницани оптималлаштириш, футеровкани мустаҳкамлаш ва энергия йўқотишларини камайтиришда муҳим аҳамиятга эга.

ISSN 3030-3907

Калит сўзлар: шарли мельница, DEM, сдвиг қуввати, контакт кучлари, энергия тақсимоти.

Abstract: This study investigates the internal mechanical interactions in a ball mill using the Discrete Element Method (DEM). It analyzes the evolution of contact forces and energy components—shear power, impact power, and dissipated energy. Findings show that shear power dominates internal energy flow, indicating strong abrasive interactions. These insights are critical for optimizing mill design, improving liner durability, and reducing energy losses.

Keywords: ball mill, DEM, shear power, contact forces, energy distribution.

Введение

Процесс дробления материала в шаровых мельницах определяется сложными взаимодействиями между мелющими элементами, измельчаемым сырьём и внутренней поверхностью корпуса мельницы. Глубокое понимание возникающих при этом динамических сил и соответствующих механизмов рассеивания энергии является ключевым фактором для повышения общей производительности оборудования, предсказания износа его компонентов и оптимизации инженерных решений.

Традиционные методы экспериментального анализа, как правило, не способны зафиксировать кратковременные переходные процессы с необходимой временной детализацией. В связи с этим, в последние годы возрастающее внимание привлекают численные методы моделирования, в частности метод дискретных элементов (DEM), который демонстрирует высокую точность при воспроизведении взаимодействий между частицами и между частицами и стенками на микроскопическом уровне. Этот подход предоставляет детализированную информацию о контактных нагрузках, характеристиках ударного взаимодействия и распределении мощности.

Настоящая работа посвящена комплексному анализу силовых и энергетических параметров, полученных в результате моделирования работы вращающейся шаровой мельницы с применением метода DEM. Основное внимание уделяется не визуализации моделируемых процессов, а анализу временных графиков, отображающих динамику нагрузок в мельнице. Главная задача исследования — выявить преобладающие режимы передачи мощности (ударный, сдвиговый, рассеяние) и установить их взаимосвязь с потенциальными сценариями износа и энергетической эффективностью функционирования оборудования.

Изучение внутренней динамики в шаровых мельницах значительно развилось с появлением численных методов, таких как метод дискретных

ISSN 3030-3907

элементов (DEM), который позволяет моделировать взаимодействие гранул и передачу энергии с высоким временным и пространственным разрешением.

Клири [1] был одним из пионеров применения DEM для анализа потока частиц и поведения при столкновениях в барабанных мельницах. Его работа подчеркнула способность DEM фиксировать распределение ударов и поля напряжений, предлагая понимание производительности мельницы и зон износа. Таварес и Кинг [2] расширили этот подход, связав модели разрушения частиц с DEM, продемонстрировав, что распределение энергии удара сильно коррелирует со степенью измельчения и износа футеровки. Это заложило основу для использования дескрипторов на основе энергии (удар, сдвиг, рассеивание) для оценки производительности измельчения. Более поздние исследования были сосредоточены на количественной оценке компонентов потребления энергии. Джорджевич [3] и Моррисон и Клири [4] проанализировали, как сдвиговая и ударная энергия изменяются в зависимости от скорости мельницы, геометрии подъемника и размера среды. Их моделирование показало, что сдвиговая мощность доминирует в режимах с высокой загрузкой и низкой скоростью, тогда как ударная энергия достигает пика в условиях катаракты. Говендер и др. [5] использовали ускоренную на GPU DEM для моделирования полномасштабных промышленных мельниц и извлечения непрерывных историй силы. Это позволило проводить анализ в реальном времени эволюции контактной силы и моделей прогнозирования износа на основе динамических моделей нагрузки. Ши и Койович [6] предложили основанную на энергии систему классификации для взаимодействия измельчающих сред, различая абразивный, ударный и истирающий ввод энергии. Они показали, что разные траектории частиц приводят к разным сигнатурам мощности и механизмам износа. Что касается анализа силы, Лин и др. [7] использовали комбинированное моделирование DEM-FEM для оценки того, как внутренние силы преобразуются в колебания оболочки и деформацию. Их модель позволила провести анализ напряжений на футеровках и цапфах при динамической нагрузке. Кандиа и др. [8] специально исследовали рассеивание мощности, сопоставляя данные моделирования с экспериментальными измерениями крутящего момента. Они подтвердили, что до 15% общей энергии рассеивается за счет внутреннего демпфирования и потерь на трение. Агхаджани и др. [9] сосредоточились на формировании силовой цепи и ее влиянии на передачу нагрузки в шаровых мельницах. Используя сети контактных сил из данных DEM, они определили области

ISSN 3030-3907

концентрации силы, которые коррелируют с преждевременным разрушением футеровки. Чо и Хербст [10] изучили, как потребляемая энергия связана с тонкостью продукта, и разработали прогностическую модель, связывающую спектры силы-частоты со скоростью разрушения частиц в мельницах [11-15].

Методология

В этой работе численное моделирование шаровой мельницы было проведено с использованием метода дискретных элементов (DEM) для исследования внутренних динамических условий нагрузки во время работы. Основной целью было извлечь и проанализировать параметры силы и мощности с течением времени, сосредоточившись на интенсивности и распределении механической энергии, не полагаясь на визуальные визуализации движения частиц.

Настройка моделирования

Моделируемая система представляет собой типичную цилиндрическую шаровую мельницу с подъемниками. Геометрия, размер частиц и рабочие параметры были выбраны для приближения к условиям измельчения в промышленных масштабах. Мельница была частично заполнена двумя типами частиц: сферическими шарами, представляющими собой мелющие тела, и многогранными частицами, представляющими собой измельченную руду.

Таблица № 1.

Вводные данные

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы измерения	Примечание
Уровень заполнения мельницы	–	40 %	% от объема	Объем частиц внутри мельницы
Скорость вращения барабана	–	75 %	% от критической скорости	Режим частичного каскадирования
Количество частиц	–	15 000	–	Модель содержит шары и породу

ISSN 3030-3907

Плотность шаров	$\rho_{шар}$	7 800	кг/м³	Материал – сталь
Плотность породы	$\rho_{порода}$	2 650	кг/м³	Силикатная порода
Коэффициент восстановления	e	0,35	–	Частичное сохранение энергии после удара
Коэффициент трения (статический/динамический)	$\mu_{ст}/\mu_{дин}$	0,6 / 0,5	–	Между частицами и между частицами и стенками
Коэффициент Пуассона	ν	0,25	–	Для моделируемых материалов
Модуль Юнга	E	50	МПа	Упруго-пластическое поведение породы

Извлечение данных

Результаты моделирования были проанализированы для извлечения следующих механических величин:

- Нормальная сила контакта (H) между частицами и поверхностями
- Значения мощности, соответствующие различным режимам взаимодействия:
- Мощность: Удар - энергия, передаваемая при столкновениях частиц
- Мощность: Сдвиг - энергия, связанная с тангенциальным фрикционным движением
- Мощность: Рассеивание - энергия, потерянная из-за внутреннего демпфирования материала
- Общая мощность - чистый баланс мощности во всех режимах

Все величины были записаны как функции времени, что позволило подробно наблюдать динамическое поведение. Данные были экспортированы в табличном формате и обработаны с использованием встроенных инструментов Rocky DEM и внешнего программного обеспечения для построения графиков.

ISSN 3030-3907

Результаты и обсуждение

В этом разделе представлен количественный анализ переменных силы и мощности, извлеченных из моделирования DEM. Графики иллюстрируют временную эволюцию нормальной контактной силы и различные режимы передачи мощности (полную, диссипативную, ударную и сдвиговую). Все графики были проанализированы в логарифмическом масштабе, чтобы четко уловить изменения в пределах нескольких порядков величины.

Нормальной контактной силы

На рисунке 1 показана зависящая от времени эволюция нормальной контактной силы, действующей в системе мельницы.

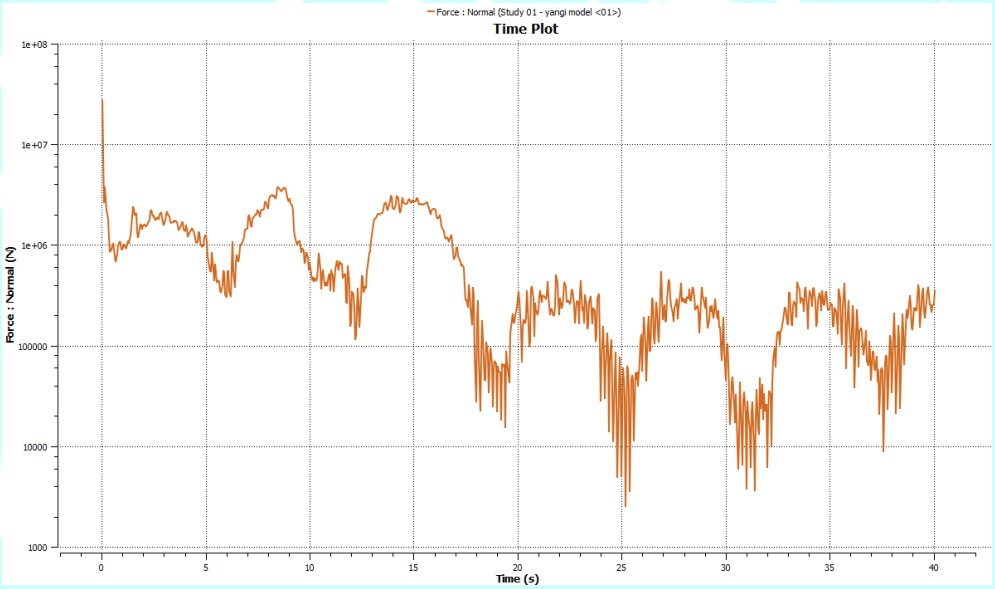


Рис. 1. Изменение нормальной силы во времени

В начале моделирования наблюдается отчетливый всплеск силы, достигающий более 10^7 Н, что соответствует начальной нагрузке или динамическому взаимодействию частиц со структурой мельницы. После этого пика система демонстрирует серию затухающих колебаний, указывающих на установление динамического равновесия. Несколько спадов и пиков силы наблюдаются между 5–40 с, что соответствует периодам каскадных сред и столкновений с подъемниками. Повторяющийся колебательный паттерн отражает циклическую природу движения частиц и частоты ударов во время вращения мельницы.

Анализ общей мощности

Рисунок 2 иллюстрирует общую мощность, обмениваемую внутри системы с течением времени.

ISSN 3030-3907

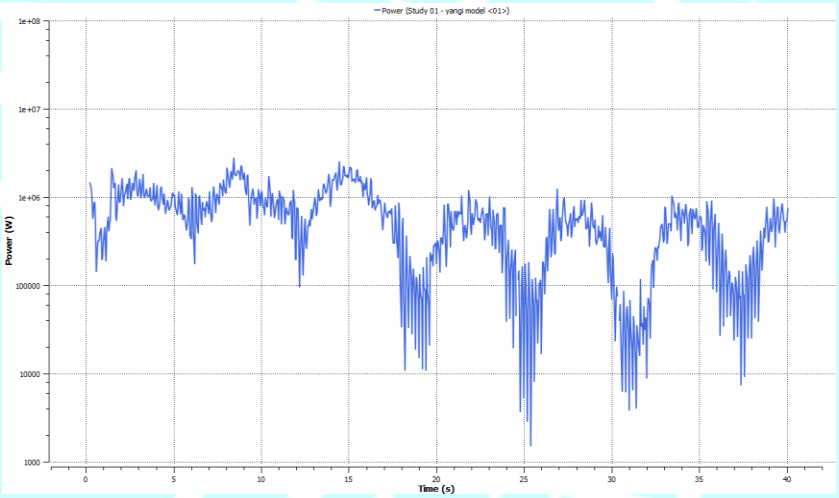


Рис. 2. Общая мощность с течением времени

Мощность колеблется от 10^5 Вт до почти 10^8 Вт, с доминирующими колебаниями, которые коррелируют с силовыми событиями. Резкие падения мощности совпадают с контактными потерями или событиями перераспределения частиц, что указывает на временное снижение столкновений или фрикционного взаимодействия. В целом сигнал мощности отражает картину механического перемешивания внутри камеры мельницы, а периодический характер поддерживает идентификацию циклических фаз измельчения.

Рассеиваемая мощность

Рисунок 3 показывает рассеиваемую мощность, представляющую потери энергии из-за внутреннего затухания, трения и неупругой деформации.

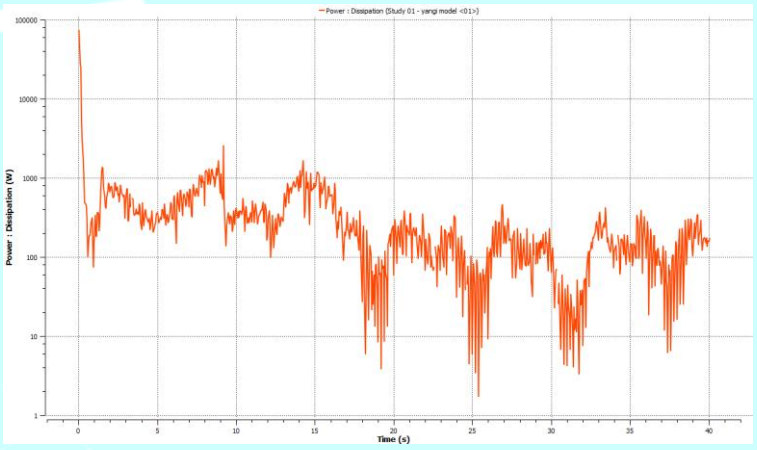


Рис. 3. Рассеивание мощности с течением времени

Рассеиваемая мощность в основном варьируется от 10^1 до 10^4 Вт, достигая пиков около тех же точек, что и максимумы силы. Это подтверждает, что рассеивание энергии усиливается в периоды сильного удара. Хотя его величина ниже, чем в других режимах мощности, рассеивание имеет решающее значение для понимания процессов износа и

ISSN 3030-3907

выделения тепла в мельнице. Тенденция указывает на непрерывное, но относительно стабильное сопротивление трения на протяжении всей операции измельчения.

Мощность удара

На рисунке 4 показана мощность, приписываемая событиям соударения частица-частица и частица-стенка.



Рис. 4. Мощность удара с течением времени

Мощность удара охватывает широкий диапазон от 0,1 до 10^5 Вт, причем самые высокие значения наблюдаются в первые секунды моделирования. Эти значения постепенно стабилизируются с периодическими всплесками, связанными с падением шара и катарактальными движениями. Относительно более низкая энергия после 20 секунд указывает на то, что события соударения становятся более однородными и менее интенсивными, что поддерживает переход к более стабильному режиму измельчения.

Мощность сдвига

Рисунок 5 визуализирует энергию, связанную с тангенциальными (скользящими) взаимодействиями между поверхностями.

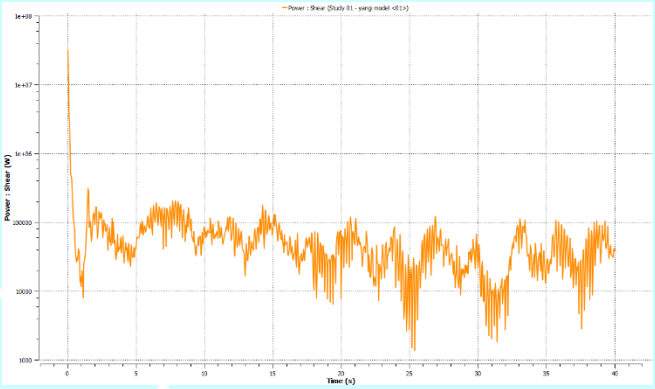


Рис. 5. Мощность сдвига с течением времени

ISSN 3030-3907

Мощность сдвига демонстрирует высокие и постоянные значения, в диапазоне от 10^4 до более 10^7 Вт, доминируя в энергетическом ландшафте в этой симуляции. Постоянная амплитуда мощности сдвига предполагает высокоабразивную среду с непрерывными поверхностными взаимодействиями, что является ключевым индикатором потенциальных зон износа футеровки. По сравнению с ударом и рассеиванием мощность сдвига, по-видимому, вносит наибольший вклад во внутреннюю передачу энергии в этой системе.

Заключение

Моделирование показывает многофазный энергетический профиль, где начальные удары интенсивны, за которыми следует более стабильный механический режим. Мощность сдвига доминирует на протяжении всего процесса, подчеркивая важность тангенциальных сил в долгосрочном износе компонентов. Ударная и рассеивающая мощность показывают импульсное поведение, связанное с наслоением частиц и каскадированием. Этот анализ подтверждает точку зрения о том, что поведение энергии внутри мельницы носит циклический характер и сконцентрировано на определенных участках, что позволяет получить представление о том, где и когда возникают наиболее агрессивные механические условия.

Список использованной литературы

1. Cleary P. W. (2001). Charge behaviour and power consumption in ball mills: sensitivity to mill operating conditions, liner geometry and charge composition. International Journal of Mineral Processing, 63(2), 79–114.
2. Tavares L. M., King R. P. (1998). Single-particle fracture under impact loading. International Journal of Mineral Processing, 54(1–4), 1–28.
3. Djordjevic N. (2003). Simulation of breakage in ball mills using DEM: Comparison with experiment. Minerals Engineering, 16(6), 507–513.
4. Morrison R. D., Cleary, P. W. (2008). Using DEM to model ore breakage within a pilot scale SAG mill. Minerals Engineering, 21(9), 719–736.
5. Govender N., Wilke D. N., Kok S. (2016). Large-scale GPU-based DEM modeling of industrial tumbling mills. Minerals Engineering, 91, 2–13.
6. Shi F., Kojovic T. (2007). Validation of a model for impact breakage incorporating particle size effect. International Journal of Mineral Processing, 82(3), 156–163.
7. Lin Y., Yao Y., Huang Z. (2019). Structural response of the mill shell under impact loading from grinding media: A DEM–FEM study. Engineering Failure Analysis, 102, 134–148.

ISSN 3030-3907

8. Kandiah K., van der Westhuizen, A. P., Mainza A. N. (2020). A study of the energy partitioning in tumbling mills using DEM. Minerals Engineering, 146, 106146.

9. Aghajani A., Hashemolhosseini H., Sharifi M. (2021). Force chain distribution and its correlation with liner wear in ball mills. Powder Technology, 386, 248–258.

10. Cho H., Herbst J. A. (1996). Simulation of the kinetics of breakage as applied to a ball mill. Powder Technology, 86(3), 239–251.

11. Жуманазаров А.Р., Эгамбердиев И.П., Очилов У.Ю. Разработка модели дискретных элементов для шаровых мельниц. Proceedings of the v-international conference on integrated innovative development of zarafshan region: achievements, challenges and prospects. 2024. Vol.2. 11-12 p.

12. Жуманазаров А.Р., Эгамбердиев И.П., Очилов У.Ю. Влияние объема суспензии на процесс измельчения вращающейся мельницы с использованием мультиметодного подхода и анализа параметров. Proceedings of the v-international conference on integrated innovative development of zarafshan region: achievements, challenges and prospects. 2024. Vol.2. 17-18 p.

13. N. Karimova, U. Ochilov, Sh. Yakhshiev I. Egamberdiev, Predictive maintenance of cutting tools using artificial neural networks, XIV International Conference on Transport Infrastructure: Territory Development and Sustainability (TITDS-XIV-2023). 2023.

14. Sh. Yakhshiev, E. Egamberdiev, A. Mamadiyarov, Kh. Ashurov, N. Khamroev, Research on Engineering Structures and Materials 9(1), 163-179, 2023.

15. N. Karimova, U. Ochilov, O. Tuyboyov, Sh. Yakhshiev, I. Egamberdiev, Advanced surface roughness characterization using 3D scanning technologies and YOLOv4, IV International Conference on Geotechnology, Mining and Rational Use of Natural Resources, GEOTECH-2024.

ISSN 3030-3907