

Курсовая работа по теме:
Моделирование измельчения руды в
барабане рудоразмольной мельницы
методом дискретных элементов

Катнов Артем

27 декабря 2020 г.

Содержание

1	Введение	3
1.1	Введение в метод дискретных элементов	3
1.2	Обзор поставленных задач	4
1.3	Обзор аналогов	5
2	Основная часть. Построение математической модели	6
2.1	Упрощения метода дискретных элементов	6
2.2	Расчёт контактных сил	7
2.3	Диссипация	7
2.4	Введение угловой координаты	8
2.5	Итерационное уточнение	11
2.6	Описание алгоритма	13
2.7	Анализ и проверка адекватности существующей модели . . .	15
3	Постановка задачи	17
3.1	Модель рудоразмольной мельницы	17
3.2	Реальные параметры	17
4	Результаты моделирования	18
5	Заключение	19
	Список литературы	20

1 Введение

1.1 Введение в метод дискретных элементов

Впервые метод дискретных элементов (в дальнейшем МДЭ или DEM) был предложен в 1971 году инженерами Cundall P. A. и Otto D. L. Strack [1] для моделирования поведения мелких частиц горных пород. МДЭ представляет собой совокупность методов для изучения сыпучих сред.

Сыпучими средами вполне можно назвать любые дискретизированные среды (песок, грунт, зерно и пр.). Сыпучая среда сложна в аналитическом представлении, потому что в зависимости от многих факторов она может проявлять твердоподобное, жидкоподобное или комбинированное свойства.

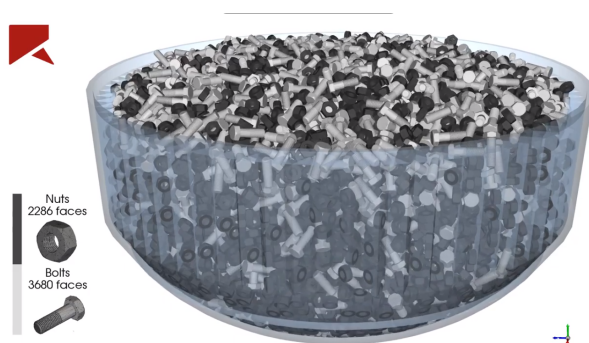



Рис. 1: Демонстрация сыпучей среды (в данном случае болты и гайки тоже являются сыпучей средой).

Численный расчёт для сыпучих сред проводится независимо для каждого элемента, а взаимодействуют они [элементы] только в точках контакта. Основываясь на всем вышесказанном в 1971 году и появился метод дискретных элементов.

Уже на данном этапе мы можем выделить основные преимущество и недостаток данного метода. Преимуществом можно назвать возможность моделирования ситуации и сыпучей среды любой сложности без проведения сложных дорогостоящих экспериментов. Недостатком же является высокая требовательность к вычислительным ресурсам.

1.2 Обзор поставленных задач

На каждом шаге по времени для найденных взаимодействий происходит  счёт соответствующих контактных сил. Существует несколько различных моделей силы контакта, подходящих для различных применений, материалов и условий.

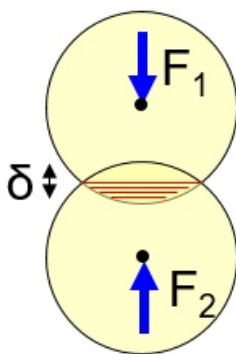


Рис. 2: Демонстрация контактных сил при пересечении двух шаров.

Силы, действующие на каждую частицу, вычисляются из исходных данных, соответствующих физических законов и выбранной модели контакта (модели контакта необходимо выбирать исходя из условий применения). В случае необходимости к расчёту могут быть подключены дополнительные модели: модель когезии, модель демпфирования и т.п., так же хотелось бы отметить что в расчёте могут иметь влияние такие силы, как:

- Трение, при касании двух частиц
- Отскакивание, при столкновении
- Гравитация
- Притяжение (адгезия, жидкостное соединение)

После определения контактных сил, могут быть добавлены любые другие силы внешнего тела. Внешние силы возникают из-за существования одного или нескольких физических полей, таких как гравитационные, электромагнитные или гидродинамические поля.

После нахождения результирующей силы, взаимодействующей на каждую частицу, основываясь на втором законе Ньютона, находится новая по-

зиция всех частиц к началу следующего шага по времени. Временной шаг сменяется на следующий и цикл повторяется.

Важно также упомянуть, что данный метод не ограничивает расчёт только сферическими телами. Для создания тел любой другой сложной формы можно представить множеством элементов сфер, жёстко связанных между собой (мультиферный агломерат).

В данной работе помимо расчёта контактных сил действующих друг на друга также вводятся гравитационное поле, учёт сил трения, а также модель демпфирования. В качестве рассматриваемой модели принимается сферическое тело.

1.3 Обзор аналогов


Большинство современного программного обеспечения для инженерных расчётов имеет в себе встроенные МДЭ решатели (Ansys Fluent, LS-DYNA), в свою очередь ПО специализирующееся на МДЭ (ESSS Rocky, open-source LIGGGHTS, EDEM (DEM Solutions Ltd.)), зачастую имеет большее широкий спектр возможностей для расчёта поведения сыпучей среды, таких как большее количество моделей контактных сил.

За счёт использования GPU (имеющих большее количество вычислительных ядер), большинство программ преодолело миллион частиц, которые одновременно могут находиться в области расчёта. Распараллеливание процессов и введение многопоточной работы может заметно ускорить работу данного итерационного расчёта.


2 Основная часть. Построение математической модели


2.1 Упрощения метода дискретных элементов

В МДЭ есть несколько основных упрощений.

 1) При численном описании динамического поведения принимаются временные шаги, в течение которых скорости и ускорения считаются постоянными. Метод дискретных элементов основан на идее, что выбранный временной шаг настолько мал, что в течение одного временного шага **возмущения не могут распространяться с любого элемента дальше, чем на его ближайших соседей**. Тогда во все времена результирующие силы на любом элементе определяются исключительно его взаимодействием с элементами, с которыми он находится в контакте. Именно эта ключевая особенность метода отдельных элементов позволяет проследить нелинейное взаимодействие большого числа дисков без чрезмерных требований к памяти или необходимости итерационной процедуры.

2) Считается, что шары не деформируются. Деформации отдельных частиц малы по сравнению с деформацией дискретной среды в целом.

 Основная деформация среды обусловлена прежде всего движением частиц как твёрдых тел. Поэтому точное моделирование деформации частиц не является необходимым для получения хорошей аппроксимации механического поведения. В данном методе частицам разрешено перекрывать друг друга в точках соприкосновения. Это перекрывающее поведение занимает место деформации отдельных частиц. Величина перекрытия напрямую связана с контактной силой, как будет описано ниже. Однако следует отметить, что эти перекрытия малы по отношению к размерам частиц

 Безусловно, при вычислении движений каждой частицы возникают **необратимые погрешности**, а задача вычисления индивидуальных траекторий

принципиально нелинейна и **устойчива**. Однако, исходя из физических соображений, можно ожидать, что эти обстоятельства не повлияют на макроскопическую усреднённую картину **процесса**.

2.2 **расчёт контактных сил**

Контактная сила шаров при их пересечении будет определяться как

$$F_n = k_n \cdot \delta_n \quad (1)$$

где F_n — контактная сила, возникающая в точке контакта и действующая на оба шара, [Н];

k_n — коэффициент жёсткости, [Н/м];

δ_n — **деформация**, так называемое вхождение шаров друг в друга, [м].

При построении модели расчёта сил при взаимодействии элементов друг с другом необходимо определиться с выбором построения модели жёсткости. Cundall в своей работе [1] описывал постоянную жёсткость, которая зависит исключительно от свойств материала.

$$k_n = const \quad (2)$$

В дальнейшей работе программы будет выбрана данная модель.

2.3 **диссипация**

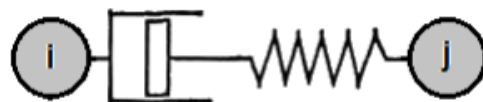


Рис. 3: При контактном взаимодействии связь шаров можно представить в виде пружины и демпфера.

Силы диссипации возникают, потому что контактное взаимодействие двух шаров воспринимают как пружину с демпфером (рисунок 2.3). Энергия сжатой пружины также будет учитываться далее и записываться как потенциальная.

$$E_{pot} = \frac{k \cdot \delta^2}{2}$$

где E_{pot} — энергия сжатия пружины, [Дж];

k — жёсткость пружины, [Н / м];

δ — проникновение шаров друг в друга в направлении нормали, [м].

Силы диссипации линейно зависят от относительной скорости и действуют в противоположном направлении. Относительная скорость для каждого шара считается в направлении нормали. Нормалью далее будем называть направление от центра шара до центра шара с которым он контактирует.

$$D_n = c_n \cdot v_n \quad (3)$$

где D_n — сила диссипации, [Н];

c_n — коэффициент диссипации, [(Н · с) / м];

v_n — относительная скорость движения шаров в нормальном направлении, [м / с].

Как и силы гравитации в численном методе силы диссипации будут суммироваться и интегрироваться для расчёта положения, скорости и ускорения тела на очередном шаге.

2.4 ведение угловой координаты

В процессе взаимодействия двух шаров помимо силы в нормальном направлении из-за коэффициентов трения появляются сила в тангенциальном направлении и момент.

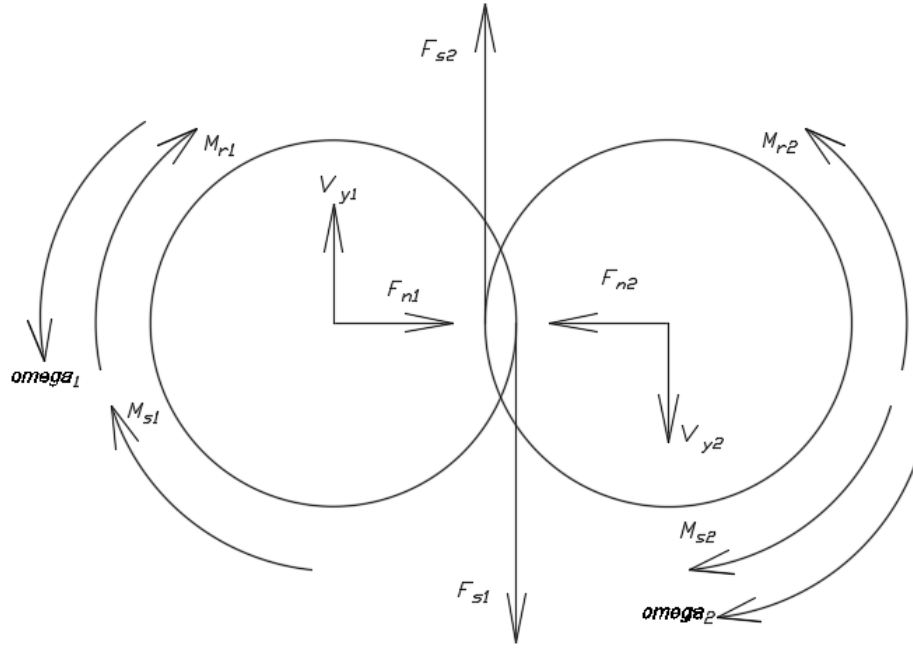


Рис. 4: Силы возникающие в шарах при контактном взаимодействии.

Сила в тангенциальном направлении будет появляться из-за трения скольжения и направлена в противоположном относительно тангенциальной скорости шара (относительно другого шара) [2]. На рисунке 2.4 сила скольжения обозначена F_s . Сила скольжения определяется по формуле

$$F_s = \mu_s \cdot F_n \cdot \text{sign}(v_{rel_tan}) \quad v_{rel_tan} \neq 0 \quad (4)$$

где μ_s — безразмерный коэффициент трения скольжения (зависит только от свойств материала);

F_n — контактная сила действующая на элемент в нормальном направлении, [Н];

v_{rel_tan} — тангенциальная скорость шара, относительно другого шара, [м/с].

Отдельного обсуждения стоит расчёт относительной тангенциальной скорости шара. Помимо тангенциальной скорости (v_y на рисунке 2.4) в относительную тангенциальную скорость также будет входить угловая скорость домноженная на радиус шара. Итого, формула для определения v_{rel_tan}

выглядит следующим образом (верхним индексом обозначены номера шаров: 1 – шар для которого проводится расчёт, 2 – шар, вступивший с ним в контакт):

$$v_{rel_tan}^1 = v_y^1 - v_y^2 - (\omega_1 \cdot R_1 + \omega_2 \cdot R_2) \quad (5)$$

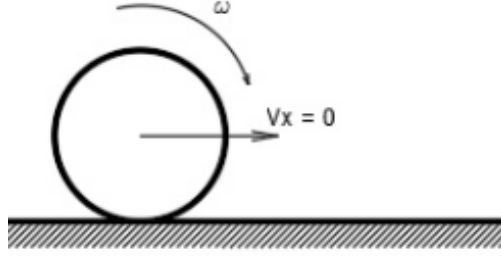


Рис. 5: Шар должен катиться по неабсолютно гладкому полу при ненулевой угловой скорости и нулевой линейной.

Помимо понятного с точки зрения физического смысла объяснения необходимости учёта добавка угловой скорости можно привести следующий пример. Если вращающийся вокруг оси параллельной полу шар (не имеющий линейной скорости) поставить на этот пол, то шар обретёт линейную скорость и покатится (рисунок 2.4). Этот эффект объясняется наличием силы трения скольжения и этого самого добавка.

Из-за того что сила F_s действует в точке контакта при переносе её в центр тяжести от неё появляется момент M_s , который определяется по формуле ниже с учётом знака перевода из линейной координаты в угловую.

$$M_s = F_s \cdot R_{eff} \quad (6)$$

где $\frac{1}{R_{eff}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ — эффективный радиус, [м]

Момент M_r же появляется из-за трения качения и определяется следующим образом.

$$M_r = \mu_r \cdot F_n \cdot R_{eff} \cdot \omega_{rel} \quad \omega_{rel} \neq 0 \quad (7)$$

где μ_r — безразмерный коэффициент трения качения (зависит только от свойств материала);


ω_{rel} — угловая скорость шара, относительно другого шара, [рад/с].


Т.к. ω_{rel} носительная угловая скорость она считается по формуле

$$\omega_{rel} = \omega_1 + \omega_2$$

В этих формулах вводится эффективный радиус из следующих соображений: если домножать силу на обычный радиус, то на каждом моменте t данного расчёта мы не можем говорить о выполнении второго закона Ньютона (при разных радиусах контактирующих шаров моменты M_s и M_r будут разные по модулю на шарах, участвующих в контакте). Эффективный радиус же позволяет добиться этого в каждый момент времени.

5 Итерационное уточнение

Интегрирование в данной задаче можно было бы назвать точным, а не численным если бы задача была линейной. Но данная задача является нелинейной. Если на шаге t на тело действует сила F_t , то на следующем шаге $t + \Delta t$ уже будет действовать сила $F_{t+\Delta t}$, которая будет угой. Закон изменения силы заранее неизвестен.

рмем изменение силы линейным на шаге от t до $t + \Delta t$ и тогда для интегрирования необходимо ввести ещё один член, который называется рывок. Рывок характеризует изменение ускорения. Обозначим рывок b_n . Тогда

$$\begin{aligned}
a_{t+\Delta t} &= a_t + b_n \cdot \Delta t \\
v_{t+\Delta t} &= v_t + a_t \cdot \Delta t + \frac{b_n \cdot \Delta t^2}{2} \\
x_{t+\Delta t} &= x_t + v_t \cdot \Delta t + \frac{a_t \cdot \Delta t^2}{2} + \frac{b_n \cdot \Delta t^3}{6}
\end{aligned}$$

Сам по себе рывок можно рассчитать как

$$b_n = \frac{a_{t+\Delta t} - a_t}{\Delta t} \quad (8)$$

Но пока мы не оказались на следующем шаге $a_{t+\Delta t}$ нам не известен. Поэтому для расчёта рывка проводится итерационный процесс. На каждом шаге t проводится расчёт изменения вхождения $\Delta\delta = \delta_{t+\Delta t} - \delta_t$ по следующей формуле

$$\Delta\delta = v_t \cdot \Delta t + \frac{a_t \cdot \Delta t^2}{2} + \frac{b_n \cdot \Delta t^3}{6}$$

В первую итерацию цикла b_n принимается равным нулю. Отсюда можем получить перекрытие на следующем шагу $\delta_{t+\Delta t} = \delta_t + \Delta\delta$. Далее по закону зависимости 1 необходимо найти силу на следующем шаге $F_{t+\Delta t}$ и ускорение $a_{t+\Delta t}$.

Следующим действием нужно проверить удовлетворяет ли нас $a_{t+\Delta t}$ и если нет – начать итерационную процедуру заново. Проверкой того что $a_{t+\Delta t}$ нас удовлетворяет и его не надо уточнять (то есть условием выхода из цикла) является проверка сходимости ускорения. Это значит, что $a_{t+\Delta t}^k$ должно не значительно отличаться от $a_{t+\Delta t}^{k-1}$ (верхним индексом отмечен номер итерации на шаге t). Ещё условие сходимости можно записать так

$$\left| \frac{a_{t+\Delta t}^k - a_{t+\Delta t}^{k-1}}{a_{t+\Delta t}^k} \right| < \varepsilon_a \quad (9)$$

После нахождения $a_{t+\Delta t}$ по формуле 8 можем найти рывок b .

Данный процесс показан для нахождения рывка в направлении нормали (понятие нормали было введено в разделе введения диссипации 2.3). Процесс нахождения рывков в тангенциальном и угловом направлениях не сильно отличается от указанного выше.

На каждой итерации после нахождения части нормальной контактной силы $\Delta F = F_{t+\Delta t} - F_t$ мы можем найти ΔF_s , ΔM_s , ΔM_r по формулам 4, 6 и 7, соответственно. Аналогично формуле 8 находим рывки в тангенциальном и угловом направлениях.

$$b_t = \frac{a_{t+\Delta t} - a_t}{\Delta t} \quad (10)$$

$$b_\theta = \frac{\varepsilon_{t+\Delta t} - \varepsilon_t}{\Delta t} \quad (11)$$

В таком случае условием выхода из цикла будет удовлетворение условию 9 для всех трёх направлений одновременно.

2.6 Описание алгоритма



Рис. 6: Алгоритм метода в псевдокоде

Перейдём непосредственно к описанию работы алгоритма. В первом приближении алгоритм можно представить как схему 2.6. Соответственно концом расчёта будем считать состояние равновесия шаров.

В двойном цикле проходимся по каждому возможному сочетанию шаров и проверяем пересекаются ли они. Если нет – проверяем следующую возможную пару. Если да – необходимо перейти в локальную систему координат, связанную с положением шаров в пространстве друг относительно друга. Все величины, необходимые для расчёта (скорость, ускорение и пр.), переводятся в данную систему координат.

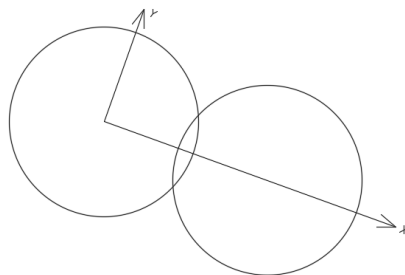


Рис. 7: Демонстрация локальной системы координат

Далее необходимо рассчитать силовые факторы, действующие на шар: силы контактного взаимодействия (по алгоритму 2.2), силы диссипации (по алгоритму 2.3), вращательные силовые факторы (по алгоритму 2.4). Нужно также не забыть учесть для каждого из шаров силы удалённого действия которые считаются в каждый момент времени (в нашей модели это будет поле ускорений (месса гравитации)). После нахождения сочетания сил действующих на тело проводится итерационную процедуру уточнения (описанную в 2.5)

Когда говорится о каждом возможном сочетании шаров имеется в виду также взаимодействие со стенкой, которой ограничено движение шара. В данной работе алгоритм взаимодействия со стенкой не описывался, так как вместо стенки можно представить шар с бесконечным радиусом – таким образом это упрощённая модель данного алгоритма, не требующая дополнительных пояснений.

После – необходим переход в глобальную систему координат.

После расчёта и уточнения всех сил происходит интегрирование – расчёт нового положения каждого из шаров.

Можем довольно легко оценить сложность этого алгоритма: время – $O(n^2)$, память $O(n)$. Безусловно для большого числа элементов (от 100) такая сложность по времени – непозволительная роскошь. Путей решения данной проблемы два. Первый – так называемое хэширование. Деление пространства на определённые участки и проверка пересечения шаров не со всеми шарами, а только с близлежащими участками. При правильном выборе сетки, которой покрывается пространство это позволит уменьшить сложность по времени до $O(n)$.

Второй путь решения данной проблемы – распараллеливание процессов подсчёта на одном шаге разных независимых участков пространство (необходимо сначала будет реализовать первый подход). Это сможет увеличить время подсчёта лишь на константу, но эта константа будет тем больше, чем больше шаров участвует в моделировании.

2.7 Анализ и проверка адекватности существующей модели

В качестве проверки адекватности построения данной модели, а также проверки ошибок в решении были использованы несколько различных подходов.

1) Для проверки физичности и логичности результатов использовалось отображение положения и движения шаров. При прорисовке, например, каждого сотого или тысячного кадра это не так заметно сказывалось на скорости работы программы (время одной прорисовки мало по сравнению с расчётом ста шагов N -го количества шаров), но позволяло оценить корректность и найти логические ошибки на самых ранних стадиях построения решения.

2) Для проверки энергетической составляющей работы алгоритма (а также для корректности диссипирующей модели) использовались графики изменения энергии всей системы во времени (при нулевой диссипации энергия должна быть неизменной, при ненулевой – энергия должна падать, а система приходить к состоянию равновесия) (рисунок 2.7) и графики изменения скорости и контактной силы (рисунок 2.7). Нижеприведенные графики являются примером и не могут быть проанализированы вне контекста.

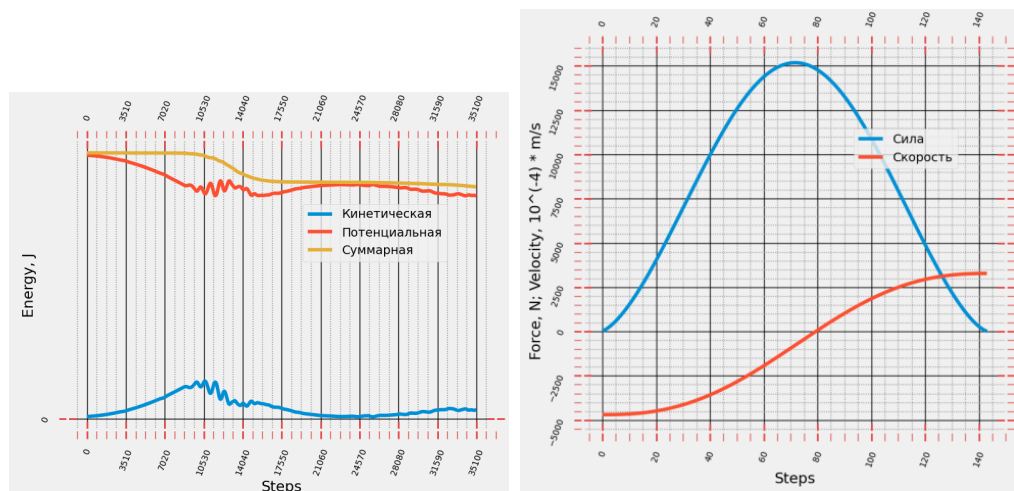


Рис. 8: Графики зависимости энергии, силы и скорости

3) Для проверки корректности вращательных модели был проведён ряд тривиальных тестов (около 20 штук) каждый из которых можно было посчитать руками. Проверялись корректность направления возникающих сил, моментов и скоростей при различных ситуациях (два шара с нулевой линейной скоростью и ненулевой угловой контактируют, два шара с нулевой угловой скоростью и ненулевой линейной контактируют и пр.) (рисунок 2.7) Каждый из этих тестов был пройден.

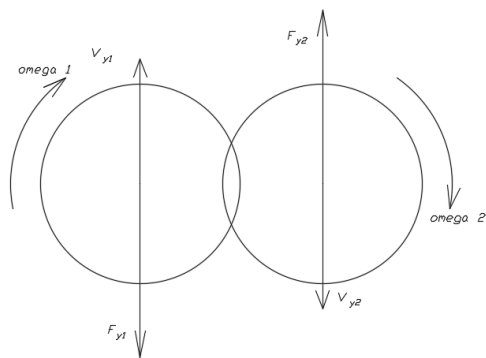


Рис. 9: Пример теста: известны скорости шаров: можем проанализировать направления сил и угловой скорости

3 Постановка задачи

3.1 Модель рудоразмольной мельницы

3.2 Реальные параметры

4 Результаты моделирования

5 Заключение

Список литературы

- [1] Cundall P. A., Strack O. D. L. A discrete numerical model for granular assemblies //geotechnique. – 1979. – Т. 29. – №. 1. – С. 47-65.
- [2] Syed Z., Tekeste M., White D. A coupled sliding and rolling friction model for DEM calibration //Journal of Terramechanics. – 2017. – Т. 72. – С. 9-20.
- [3] Караваев А. С., Копысов С. П., Сармакеева А. С. Моделирование динамики произвольных тел методом дискретных элементов //Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. – 2015. – Т. 25. – №. 4. – С. 473-482.