

УДК 622.02:539.2/.8

## **ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ПОРОДНЫХ МАССИВОВ**

Клинцов В.С., студент гр. ФПа-201, 1 курс  
Научный руководитель: Марков С.О., к.т.н., доцент  
Кузбасский государственный технический университет  
имени Т.Ф. Горбачева,  
г. Кемерово

Горные породы представляют собой естественные агрегаты минералов определенного состава и строения, образующиеся в недрах Земли или на ее поверхности в результате различных геологических процессов. Распространенность горных пород неодинаковая. Магматические и метаморфические породы слагают 95% земной коры, и только 5% составляют осадочные породы [1].

Разработка массивов горных пород является сложным и системным процессом. В связи с этим возникает потребность в прогнозировании поведения отдельных элементов разработки горных пород, таких как отвалы, дамбы и других техногенных породных массивов, возводимых в процессе строительства, ведения открытых и подземных горных работ. Интерес исследования представляют параметры структуры и поровой среды возводимых техногенных массивов и их изменение с течением времени, протекание процессов тепломассопереноса. В результате возникает проблема в установлении закономерностей управления параметрами поровой среды насыпных техногенных породных массивов и их изменения с течением времени.

Для исследования техногенных породных массивов используется его модели. Под моделью понимается искусственный или естественный объект, помещенный в искусственные или естественные условия, который обладает существенным, с точки зрения познания, сходством с изучаемым объектом и может заменить его, в заданном отношении будучи объектом исследования [2]. Следовательно, под моделированием - замещение одного исходного объекта другим объектом, называемым моделью, и проведение экспериментов с моделью с целью получения информации о системе путем исследования свойств модели. Моделирование предоставляет возможность исследования таких объектов, прямой эксперимент с которыми трудно выполнить, экономически невыгоден или вообще невозможен [3]. Моделирование реальных техногенных массивов является трудно выполняемым в реальных условиях, а в некоторых случаях невозможно. В связи с этим многие исследователи прибегают к моделированию прототипов или к численным методам моделирования.

Численные методы можно разделить на три группы: континуум, дисконтинуум и гибридные методы, которые включают методы континуума и дисконтинуума [4]. Континуум (continuum) — это исследование сплошной среды, в рамках которой пренебрегают структурой исследуемых тел и сред, при этом микроструктурные характеристики усредняются до самого малого объема, а исследуемое вещество полностью заполняет заданный объем (рис. 1). В рамках данного моделирования поведение, движение и взаимодействие частиц или блоков моделируемого объекта игнорируется.

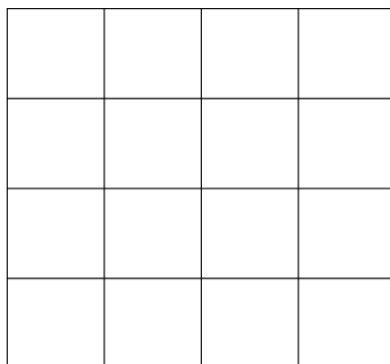


Рис. 1 Пример заполнения частицами методом континуум

Дисконтинуум, который еще именуются дискретным (discrete), представляет из себя множество численных методов для расчета движения большого количества частиц (рис. 2). Данное моделирование представляет частицу как отдельный объект, который взаимодействует с другими объектами в рамках одной системы. Дискретный метод позволяет исследовать и имитировать поведение частиц в сыпучих средах с заданным объемом или ограничениями.

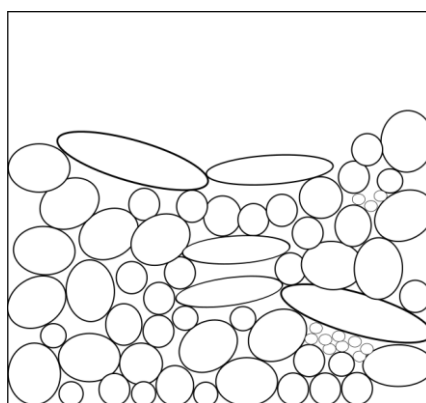


Рис. 2 Пример заполнения частицами методом дисконтинуум  
 (дискретным)

Гибридный метод представляет комбинацию двух описанных выше методов, в котором используются их лучшие свойства. Наиболее значимыми численные методы представлены в таблице 1.

Исходя из понимая того, что исследуемый объект является насыпным техногенным массивом целесообразно использовать дискретные численные методы, а именно метод дискретных элементов (Discrete Element Method).

Метод дискретных элементов может рассматриваться как обобщение метода конечных элементов. Он был разработан и впервые применен для исследования механики горных пород. При моделировании процесса этим методом задаются начальные положения и скорости частиц. Затем, исходя из этих начальных данных и также задаваемых физических законов взаимодействия частиц, вычисляются силы, действующие на каждую частицу. При этом можно учитывать самые различные законы взаимодействия; достаточно, чтобы для их описания существовали разрешимые уравнения [5, стр. 2]. Пример взаимодействия двух частиц  $T_1$  и  $T_2$  приведен на рисунке 3.

Таблица 1. Численные методы моделирования

Наименование	Методы	Аббревиатура
Континуум	Метод конечных разностей Finite Difference Method	МКР FDM
	Метод конечного объема Finite Volume Method	МКО FVM
	Метод конечных элементов Finite Element Method	МКЭ FEM
	Бессеточные методы Meshless Methods	
	Методы граничных элементов Boundary Element Method	МГЭ BEM
Дискретные (Дисконтинуум)	Метод дискретных элементов Discrete Element Method	МДЭ DEM
	Метод сети дискретных трещин Discrete Fracture Network	МСДТ DFN
Гибридные	Метод дискретных конечных элементов Discrete Finite Element Method	
	Комбинированный метод конечных дискретных элементов Combined Finite Discrete Element Method	МКЭ/МДЭ FEM/DEM

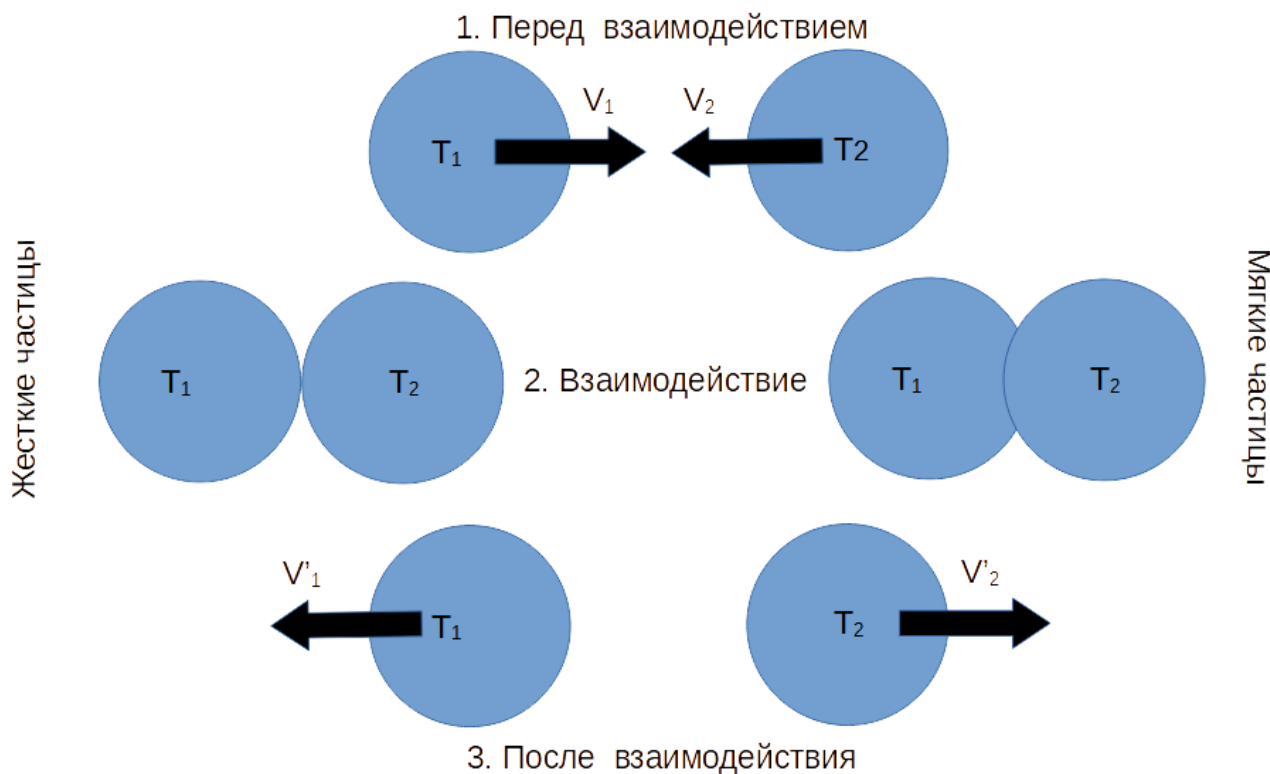


Рис. 3 Упругое взаимодействие жестких и мягких частиц

Как описано выше МДЭ основан механики взаимодействия частиц и не имеет недостатков сплошных моделей. Эффективность МДЭ обеспечена его универсальностью, его неограниченными возможностями применения [6-10] и оптимальной ресурсоемкостью эксперимента в сравнении с натуральным экспериментом. Данный метод был разработан для решения сложных уравнений теории упругости и механики. В настоящее время данный метод приобретает все большую популярность для решения задач геомеханики.

В результате основываясь на исследовании источников литературы и анализе метода дискретных элементов рекомендуется исследовать насыпные техногенные массивы методом дискретные элементы.

1. Костюк Ю.Н. Минералы и горные породы : учебное пособие : [16+] / Ю.Н. Костюк ; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Южный федеральный университет, 2019. – 123 с. : ил. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=577841> (дата обращения: 28.03.2021). – Библиогр. в кн. – ISBN 978-5-9275-3248-3. – Текст : электронный.
2. История и философия науки : учебник для бакалавриата и магистратуры / А. С. Мамзин [и др.] ; под общей редакцией А. С. Мамзина, Е. Ю. Сиверцева. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2019. — 360 с. — (Бакалавр и магистр. Академический курс). — ISBN 978-5-534-00443-4. — Текст : непосредственный
3. Алиев Т.И. Основы моделирования дискретных систем. – Спб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 363 с.
4. Nikolić M. Overview Of The Numerical Methods For The Modelling Of Rock Mechanics Problems / M. Nikolić, T. Roje-Bonacci, A. Ibrahimbegović // Technical gazette. - 2016. - №2. - С. 627-637. DOI: 10.17559/TV-20140521084228.
5. Арсентьев В.А., Блехман И.И., Блехман Л.И., Вайсберг Л.А., Иванов К.С., Кривцов А.М. Методы динамики частиц и дискретных элементов как инструмент исследования и оптимизации процессов переработки природных и техногенных материалов // Обогащение руд. 2010, № 1, с. 30–35. – URL: [http://mech.spbstu.ru/images/3/3a/Arsentiev\\_2010\\_OR.pdf](http://mech.spbstu.ru/images/3/3a/Arsentiev_2010_OR.pdf) (дата обращения: 28.03.2021). – Текст : электронный.
6. Marigo M. Discrete Element Method (DEM) for Industrial Applications: Comments on Calibration and Validation for the Modelling of Cylindrical Pellets / M. Marigo, E. Hugh Stitt // KONA Powder and Particle Journal. - 2015. - №32. - С. 236-252. DOI: 10.14356/kona.2015016.
7. Buia T.T. Discrete element modelling of the in-plane and out-of-plane behaviour of dry-joint masonry wall constructions / T.T. Buia, A. Limamb, V. Sarhosis, M. Hjiabd // KONA Powder and Particle Journal. - 2017. - №136. - С. 277-294. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.01.020.
8. Dahal B. Discrete Element Modeling of Permanent Deformation Accumulation in Railroad Ballast Considering Particle Breakage / B. Dahal, D. Mishra // Frontiers in Built Environment: Transportation and Transit Systems. - 2020. - №5. - С. 1-14. DOI10.3389/fbuil.2019.00145
9. В.М. Чернов Дискретные ортогональные преобразования на решетках целых элементов квадратичных полей // КО. 2021. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/diskretnye-ortogonalnye-preobrazovaniya-na-reshetkah-tselyh-elementov-kvadraticnyh-poley> (дата обращения: 28.03.2021).
10. Караваев Александр Сергеевич, Копысов Сергей Петрович, Сармакеева Анастасия Семеновна Построение агломератов сфер в методе дискретных элементов // Известия Института математики и информатики УдГУ. 2015. №2 (46). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/postroenie-aglomeratov-sfer-v-metode-diskretnyh-elementov> (дата обращения: 28.03.2021).