



УДК 622.023.65

ОБЗОР МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД

Гоголин В.А., Лесин Ю.В.

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

Аннотация.

Устойчивость массивов горных пород – как условно-сплошных природных, так и дисперсных техногенных – в значительной степени определяется их внутренней структурой и взаимным расположением отдельных элементов (слоев, трещин или отдельных кусков породы). Для описания напряженно-деформированного состояния сплошного массива горных пород хорошо зарекомендовал себя метод конечных элементов (finite element method, FEM). Для решения подобных задач применительно к дисперсным средам более оптимальным является метод дискретных элементов (discrete element method, DEM). При этом сплошной массив может быть анизотропным – слоистым и трещиноватым, с различными элементами залегания слоев и систем трещин и различными прочностными параметрами слоев горных пород. Дисперсный массив может быть представлен обломками различной формы и размеров с различными параметрами контактов между частицами. Прогнозирование устойчивости массивов горных пород с использованием FEM, DEM и их комбинацией в последнее время находит все более широкое применение из-за хорошего совпадения с результатами натурных испытаний. В статье приводится обзор современных методов моделирования различных массивов горных пород для определения их прочностных параметров и оценки устойчивости.

Информация о статье

Принята 29 ноября 2018 г.

Ключевые слова: зернистая среда, трещиноватый породный массив, техногенный породный массив, методы моделирования, метод дискретных элементов, метод конечных элементов

THE RESEARCH METHODS' REVIEW OF THE NATURAL AND TECHNOGENIC ROCK MASSIFS STABILITY

Vyacheslav A. Gogolin, Yuri V. Lesin

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

Abstract.

The stability of rock massifs (both continuous natural, and disjointed artificial ones) is largely determined by their internal structure and the mutual arrangement of internal elements (layers, cracks or rock pieces). To describe the stress-strain state of a solid rock massif, the finite element method (FEM) has proven itself well. For solving such problems as applied to disperse media, the discrete element method (DEM) is more optimal. In this case, a solid massif can be anisotropic - layered and fractured, with different bedding elements and strength parameters of the layers and joint systems. The dispersed technogenic massif can be represented by particles of various shapes and sizes with different parameters of contacts between ones. Prediction of the rock massifs using FEM, DEM and their combination has recently become more widely used because of the good agreement with the results of field tests.

The article provides an overview of innovative methods for modeling various rock massifs to determine their strength parameters and assess stability.

Article info

Received November 29, 2018

Keywords: granular media, disjointed rock massif, technogenic rock massif, modeling methods, DEM, FEM



Введение

Для описания процессов, протекающих в сыпучих средах, общепринят феноменологический подход, при котором дискретная сыпучая среда заменяется некоторой фиктивной сплошной средой – континуумом, характеризующимся наблюдаемыми осредненными свойствами, измеримыми, непрерывными и дифференцируемыми по пространственным координатам и времени. Этот подход получил широкое развитие в работах А.Ф. Ревуженко, С.Б. Стажевского, Е.И. Шемякина, Р.Е. Подвального, посвященных решению задач механики сыпучих сред и их приложению в горном деле [1–7].

Вместе с тем вещество, слагающее сыпучую среду, неоднородно как в своих отдельных фазах, однородных самих по себе, так и в более крупных агрегатах. Если микроскопическое свойство отдельной твердой или жидкой частицы подчиняется хорошо известным физическим законам, то общее, или макроскопическое, свойство самой сыпучей среды описывается с помощью осреднения параметров. Макроскопические свойства далеко не всегда могут быть получены из микроскопических путем статистического осреднения.

В связи с этим для изучения процессов, протекающих в сыпучих средах и существенно определяемых их геометрическим строением, целесообразно использовать структурный подход, который позволяет получить распределение структурных параметров среды и перейти к осреднению на качественно более высоком уровне, а также позволяет строить математические модели в той или иной мере отражающие своеобразие сыпучего материала как совокупности неконсолидированных частиц.

Многообразие реальных пористых тел, зернистых сред и сыпучих материалов требует введения ряда упрощений при моделировании их структуры. Однако такие упрощения не могут быть произвольными, модель должна сохранять геометрические особенности структуры, определяющие процессы в сыпучей среде. Степень упрощения зависит от задач исследования. Наиболее адекватные модели сыпучего материала как стохастической среды должны отражать статистически-вероятностный характер параметров (размер, координаты), составляющих элементов системы [8].

Для описания природного массива наиболее целесообразным представляется подход, описывающий отдельные блоки массива не как таковые, а с использованием описания несплошностей массива горных пород (трещин), разбивающих массив на отдельные. Поскольку параметры трещиноватости массива – протяженность трещин, их раскрытие, углы падения и простирания, расстояние между ними для каждой системы трещиноватости массива – достаточно удобно определять в натурных условиях, то и описание именно систем трещин при моделировании массива представляется более удобным, нежели описание каждой отдельности, формируемой пересекающимися трещинами.

В этом случае для расчета напряженно-деформированного состояния массива возможно применение как методов конечных элементов (finite element method, FEM), так и методов дискретных элементов (discrete element method, DEM). Применение DEM целесообразно при нескольких взаимопересекающихся системах трещин в массиве, изменяющихся параметрах как трещиноватости, так и литологического состава массива горных пород (например, наличия слоистости, складчатого залегания пород или широко развитой системе дизъюнктивных нарушений); при моделировании раздельнозернистых массивов разрушенных горных пород. Методы FEM применяются при более простом строении (например, одна-две системы трещин и более-менее однородный по петрографическому составу, неслоистый массив горных пород), а также при моделировании массивов разрушенных горных пород, таких как отвалы вскрыши, насыпи, дамбы, развалы взорванной горной массы.

Методы моделирования

Предпосылками создания и применения методов DEM было описание структуры зернистых сред с целью изучения их физико-структурных параметров. Описание основных параметров структуры зернистой среды позволяло прогнозировать ее поведение под действием приложенной внешней нагрузки, а также оценивать ее способность к тепло- и массопереносу.



В оптимальном случае модель структуры конкретного сыпучего материала должна была быть достаточно универсальна и применима для описания различных свойств и процессов и при этом быть по возможности наиболее удобной и простой.

Соответствие модели объекту в значительной степени определяется методами оценки параметров модели и разрешенной процессом точностью. Адекватность модели и объекта по одному или нескольким параметрам не исключает возможности значительного отличия других их свойств.

Ряд физических свойств совокупности частиц измельченных материалов определяются их морфологическими характеристиками: размером, формой и строением. Изучение связи гранулометрического состава и форм частиц сыпучих материалов с их механической прочностью, плотностью, насыпным весом, устойчивостью их упаковок, фильтрующей способностью и т.д. является предметом исследований авторов работ [9].

Попытки получения количественных характеристика реальной формы частиц продуктов измельчения привели к выводу о целесообразности использования отношения трех ортогональных размеров $l:b:h$, где l – длина, b – ширина, h – высота частицы [10–12].

Если частицы достаточно крупны и возможно экспериментально замерить их объем, характеристика формы может быть дополнена значением фактора заполнения объема (коэффициент полноты формы):

$$K_{\phi} = \frac{V_r}{l \cdot b \cdot h}, \quad (1)$$

где V_r – объем частицы, коэффициентом анизотропности [12], или численной характеристики [9]. Эти и другие критерии формы частиц [13] лишь в некоторой степени отражают ее действительную форму.

Опубликованные экспериментальные данные по замеру частиц продуктов дробления и измельчения материалов различной природы и их обобщение с использованием указанных соотношений размеров носит в большинстве случаев частный характер [9, 14, 15]. Немногие известные из литературы результаты моделирования дискретной среды многогранниками [16–18] касаются исследования свойств отдельных частиц, что не всегда позволяет применить полученные зависимости для оценки структурных параметров их совокупности. В этом смысле особый интерес представляет модель, предложенная Ю.В. Зайцевым для описания структуры заполнителя бетона в плоском случае в форме неправильных выпуклых n -угольников, где n – случайное число. Многоугольники имеют случайное расположение вершин на окружностях. В трехмерном варианте предполагается, что зерна заполнителя имеют форму многогранников, не слишком отличающуюся от сферической, со случайным числом вершин, случайно расположенных на поверхности сферы [19].

Анализ теоретических и экспериментальных исследований, посвященных моделированию дискретных сред с помощью системы многогранников правильной и неправильной формы, показывает, что детализированное рассмотрение сыпучих материалов в условиях невозможности детерминирования форм частиц при проведении технологических работ означает превышение разрешенной процессом точности.

Таким образом, в качестве исходных данных при построении модели сыпучего материала целесообразно использовать только один размер частиц – усредненный диаметр и его распределение – гранулометрическую характеристику.

Задачи о плотных упаковках шаров (3-мерный случай) и тел более сложной формы, относящиеся к области дискретной геометрии, изучаются довольно давно. В настоящее время опубликован ряд работ, посвященных вопросам расположения тел в евклидовом пространстве [20–23]. Задача определения заполнения плотной упаковки шаров пока не имеет исчерпывающего решения. Практический интерес представляет утверждение о том, что плотная упаковка шаров произвольного гранулометрического состава не может иметь большую пористость, чем плотная упаковка одинаковых шаров [23].

Сложная система частиц сыпучей среды, моделируемая системой жестких шаров, топологически беспорядочна. Аналитическое описание таких систем пока невозможно.



Одним из наиболее приемлемых методов решения практических задач при изучении массивов разрушенных горных пород, грунтов, сыпучих и зернистых материалов является математическое моделирование. При исследовании физических процессов, проходящих в сыпучих средах и зависящих от структурных параметров среды (пористости, удельной поверхности, координационного числа, геометрии пор), которые в свою очередь определяются строением "скелета" или порового пространства, построение математических структурных моделей в настоящее время является единственным путем установления количественных характеристик и зависимостей.

Из литературы известно большое число моделей упаковок сыпучих материалов, составленных из шаров или других тел правильной геометрической формы. Все эти модели можно разделить на два класса – детерминированные и вероятностные.

В детерминированных методах моделирования структуры возможны различные подходы к решению задачи. Исторически первыми были модели регулярных упаковок одинаковых шаров – гексагональная, кубическая, ромбоэдрическая, октаэдрическая и другие. Эти названия даны по виду элементарных ячеек, образованных линиями, соединяющими центры соседних шаров. Регулярные упаковки хорошо изучены. Пористость и плотность в таких моделях являются функциями числа шаров в расчетной ячейке [24].

Моделированию сыпучей среды вычислительными методами посвящена работа В.Н. Потураева, Ю.Г. Стояна и других [25], в которых приводится решение задачи о плоской плотной упаковке кругов в полубесконечной полосе.

Методики, позволяющие экспериментальным путем исследовать структурные параметры сыпучих материалов [26-28], например: изучение порового пространства методами ртутной порометрии и парафинирования; определение координационного числа с помощью заполнения упаковок стальных шаров активными жидкостями; определение плотности по срезу упаковки, залитой твердеющим составом трудоемки, дорогостоящи, требуют соблюдения техники безопасности, и при этом, дают возможность получить только средние по ансамблю значения параметров, не позволяют определить их точность, распределение и количественно оценить их зависимость от формы и размеров емкостей. Метод статистического моделирования не требует создания специального оборудования для каждой новой задачи, позволяет учесть более тонкие структурные особенности, обусловленные статистическим характером распределения элементов пористых материалов, которые не удастся отметить экспериментальными методами; исследования проводятся с использованием ЭВМ, позволяющих осуществить большой объем необходимых вычислений с высокой точностью; при проведении исследований структуры появляется возможность гибко и оперативно вносить необходимые поправки и уточнения в программу и методику, легко изменять значения параметров исследуемых систем и начальных условий.

В методе статистических испытаний осуществляется органическое сочетание математического и экспериментального методов исследований, особенно полезное при изучении явления граничного эффекта, когда размеры образцов хотя бы по одному из измерений соизмеримы с размерами емкости заполнения.

Таким образом, круг вопросов, решаемых методом статистического моделирования, достаточно широк. Это позволяет считать его многоплановым и перспективным методом, с помощью которого возможно решать важные научные задачи как теоретического, так и прикладного характера.

В целом, численные методы анализа, используемые при оценке устойчивости обнажений скальных массивов и массивов разрушенных горных пород, сводятся к трем подходам [26]:

- моделирование сплошных сред методом конечных элементов (FEM);
- моделирование блочных (несплошных, раздельнозернистых) сред методом дискретных элементов (DEM);
- гибридное моделирование (FEM-DEM).

Описание методов моделирования приведено в таблице 1.



Таблица 1. Сравнение численных методов моделирования откосных сооружений

Метод анализа	Основные параметры	Преимущества	Ограничения
Моделирование сплошной среды методом конечных элементов (FEM)	Наглядная геометрия откосных сооружений; основной критерий устойчивости (упругость, упруго-пластичность, ползучесть и т.д.); характеристики подземных вод; прочностные характеристики пород; естественное напряженное состояние массива	Позволяет среде деформироваться и разрушаться (критерий – коэффициент запаса устойчивости); моделирование сложного поведения среды; возможность 3D-моделирования; моделирование эффектов порового давления, деформации ползучести, динамической нагрузки; оценка влияния изменения параметров; разумное время моделирования на современных компьютерах	Пользователи должны обладать опытом в моделировании; определенные программно-аппаратные ограничения (связанные с оптимизацией сетки конечных элементов); недостаточность входных параметров для построения качественной модели; неспособность моделировать эффекты сильно трещиноватых массивов горных пород; затруднительный анализ результатов из-за ограничений времени выполнения.
Моделирование дискретной, блочной среды методом дискретных элементов (DEM)	Точное описание геометрии массива и частиц; начальное состояние среды; параметры жесткости и сдвиговой прочности дисперсной среды; характеристики подземных вод; естественное напряженное состояние массива	Позволяет блокам деформироваться и перемещаться относительно друг друга; позволяет моделировать сложное поведение среды и механизмы (комбинировать поведение как самих частиц, так и всей среды в сочетании с гидромеханическим и динамическим анализом); оценка влияния изменения параметров на устойчивость.	Как и в предыдущем случае, пользователи должны обладать опытом в моделировании; определенные программно-аппаратные ограничения; необходимость учитывать масштабный эффект; определение представительного объема моделируемой среды; ограниченные данные о свойствах контактов между частицами
Гибридное (FEM-DEM) моделирование	Комбинация входных параметров, указанных выше	Моделирование распространения трещин и фрагментации трещиноватого слоистого массива горных пород	Необходимы большие объемы оперативной памяти; сравнительно ограниченное практическое применение; требует постоянной калибровки

Методы моделирования сплошной среды лучше всего подходят для анализа откосов, сложенных породами в их естественном состоянии или сильно разрушенными горными породами. Ранние исследования были ограничены решением только задачи упругости и не нашли широкого применения. Большая часть современного программного обеспечения в настоящее время включает в себя средства описания дискретных несплошностей, таких как трещины и плоскости напластования. Многочисленные коммерческие программные комплексы позволяют созда-



вать различные модели массивов горных пород, включая решение задач упругости, упругопластичности, деформации и вязко-упругости (с учетом эффектов ползучести как функции релаксации напряжений от времени). На рис. 1 показан результат упругопластического моделирования оползневой деформации.

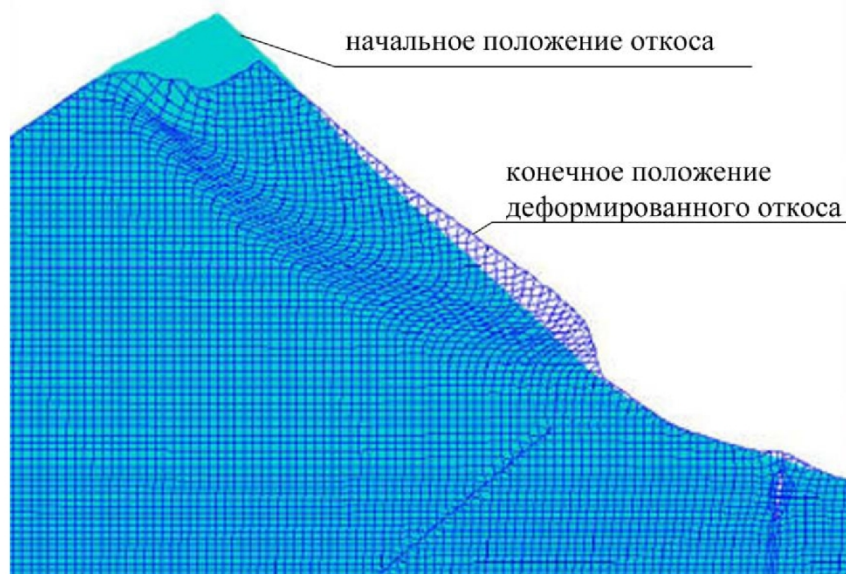


Рис. 1. Конечно-разностная модель, демонстрирующая крупную деформацию и оползневое разрушение породного склона. Горная порода рассматривается как упругопластический материал

Метод FEM реализован в программном комплексе ELCUT (ООО «ТОР»).

Хотя двумерные и трехмерные программные комплексы, основанные на применении FEM, чрезвычайно удобны для описания механизмов разрушения откосов горных пород, важно признать их ограничения. Если массив горных пород, слагающих откос, пронизан несколькими совместными системами трещин, определяющими механизм потери устойчивости массива, то более подходящим может считаться метод моделирования несплошностей среды (т. е. трещин). Методы моделирования несплошностей рассматривают моделируемую среду как агрегат отдельных, взаимодействующих тел или блоков, которые подвергаются внешним нагрузкам и подвергаются значительным перемещениям с течением времени. Эта методология в совокупности называется методом дискретных элементов (DEM).

Основой метода дискретных элементов является то, что динамические уравнения равновесия для каждого блока (или частицы) породы формулируются и неоднократно решаются до тех пор, пока не выполняются граничные условия при соприкосновении блоков (частиц) и их движении (рис. 2). Таким образом, метод учитывает сложные нелинейные взаимодействия между отдельными блоками или частицами несплошного массива горных пород.

Моделирование дискретной среды [27] представляет собой наиболее часто применяемый численный подход к моделированию породных массивов как сложных сред с точки зрения оценки устойчивости откосов. Существует несколько вариантов методологии DEM:

- метод отдельных элементов;
- анализ прерывной деформации;
- описание течения сыпучих сред.

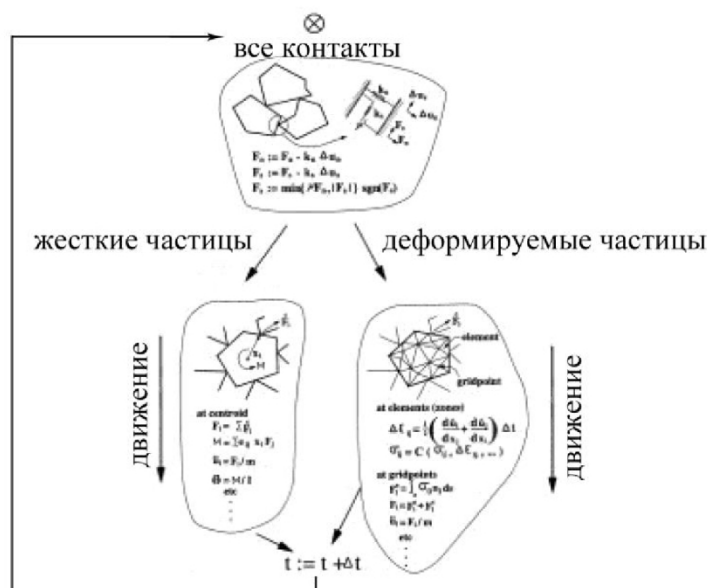


Рис. 2. Пример выполнения цикла по методу DEM

Модель Ткаченко-Уиттена [28] – это система дисков или шаров, соприкасающиеся без трения, поэтому применение этой модели ограничивается исследованием плотных коллоидных суспензий и взвесей. Модель создавалась для расчета распределения нагрузок (напряжений) в дискретной среде. В основе разработанного ими алгоритма вес вновь упакованной частицы раскладывается на две силы (по двум удерживающим контактам). Далее рассчитывается перераспределение этих усилий на все нижележащие частицы. На рис. 3 представлен элемент модели неупорядоченной структуры, где контакты каждой частицы соединены с ее центром. Разброс диаметров частиц лежит в 10 процентном интервале.

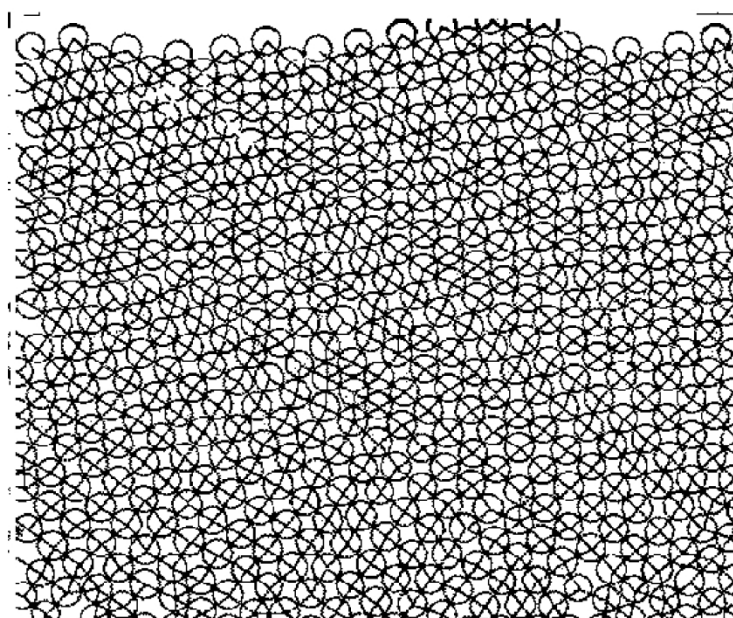


Рис. 3. Модель распределения сил в зернистой среде

Применение DEM удобно для исследования перемещения частиц зернистой среды под воздействием внешних сил. В работах К. Баги и И. Бойтяр [29, 30] исследовалось нагружение образца, состоящего из 100 хаотично и плотно уложенных отдельных частиц круглой формы с



известными коэффициентами трения в точках контактов частиц, вдоль одной из осей (рис. 4, а). Было обнаружено, что среда во время деформации упаковки образует группы частиц, расположенных близко друг к другу и имеющих приблизительно одинаковое направление вектора возможного перемещения (рис. 4, б). Такое поведение частиц характерно для несвязной зернистой среды, причем не может быть отражено механикой сплошных сред.

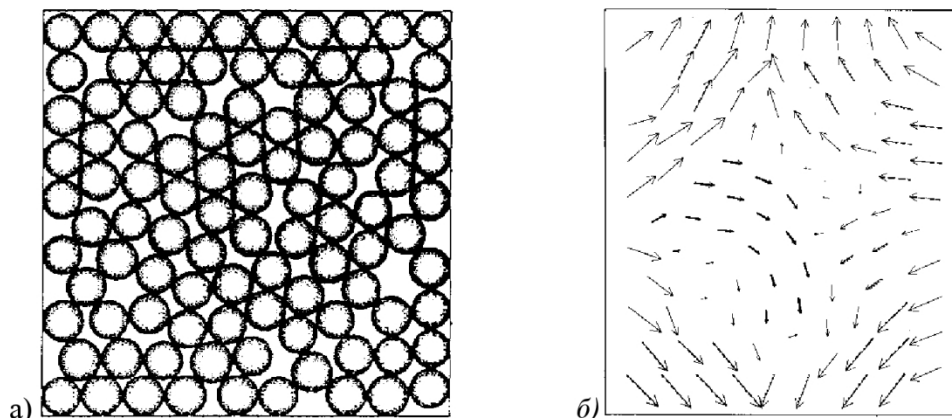


Рис. 4. Модель несвязной зернистой среды (а) и векторы возможного перемещения частиц под действием горизонтально приложенной сжимающей нагрузки (б)

Также, используя алгоритмы DEM, можно моделировать возникновение и распространение трещин в связных (сцементированных) горных породах и перемещение возникающих блоков друг относительно друга. Для этого задаются параметры взаимодействия (сцепление и угол внутреннего трения) между частицами, соответствующие поведению среды не как зернистой, а как сплошной. В работе Л. Шольте и Ф.-В. Донце [31] рассматривается процесс развития трещин в трещиноватом массиве горных пород, приводящий к его разрушению, причем сам массив представлен совокупностью отдельных сферических частиц. Взаимодействие между частицами учитывает силы трения и сцепления C , поэтому их перемещение друг относительно друга возможно только при нарушении условия равновесия Мора-Кулона, когда силы сдвига $F_{сдв}$ начинают преобладать над силами, удерживающими частицы неподвижными друг относительно друга:

$$F_{сдв} \geq F_n \cdot \tan \varphi + C, \quad (2)$$

где F_n – сила, действующая по нормали к плоскости, касательной в точке контакта между частицами, φ – угол внутреннего трения для данной горной породы.

Модельное представление среды в данном случае приведено на рис. 5.

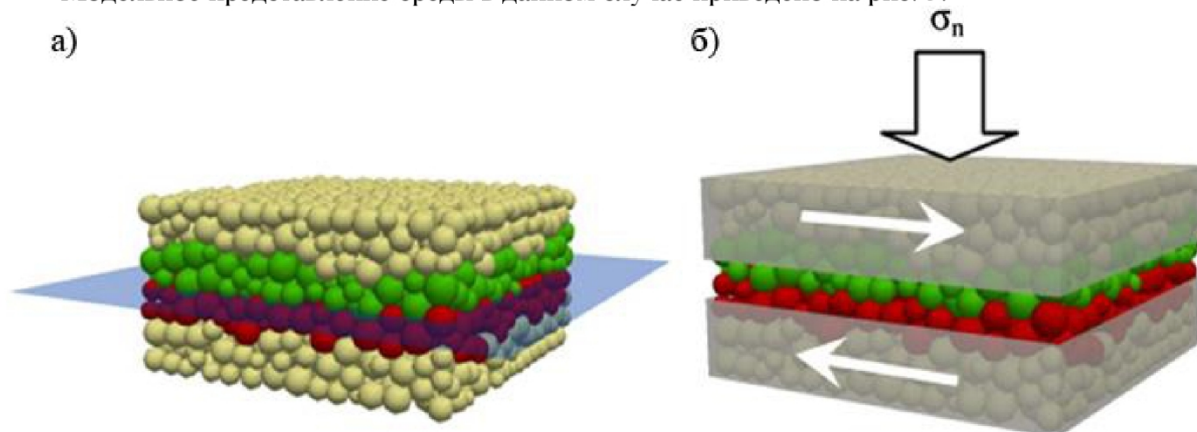


Рис. 5. Модель сплошной среды, полученная методом DEM: а) определение возможной поверхности образования трещины; б) условия сдвига по заданной плоскости трещины

На рис. 6 показано моделирование разрушения предварительно нарушенной пятью диагональными трещинами сплошной среды при сдвиговой нагрузке. При этом применялись алгоритмы DEM, изначально никак не связанные с применением законов механики сплошных сред.

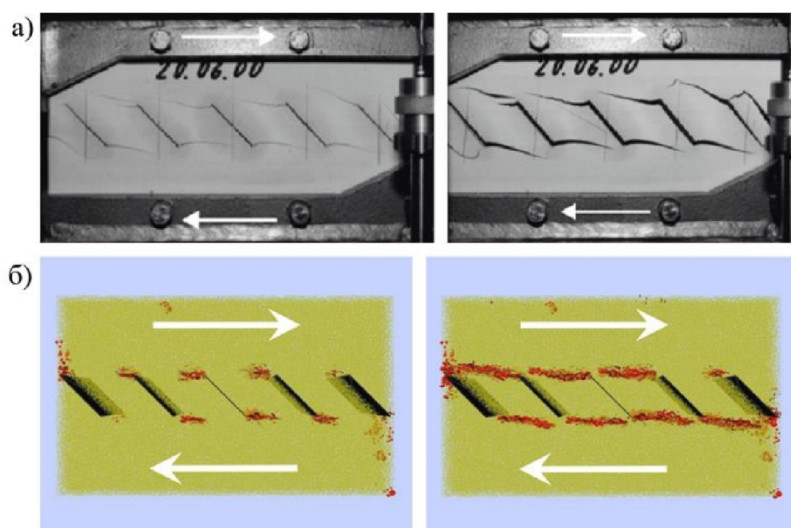


Рис. 6. Распространение трещин в образцах горных пород, нагруженных горизонтальной сдвиговой нагрузкой: а) физическое моделирование; б) численная модель с применением DEM

В работе [32] приводится анализ устойчивости откосных сооружений, в частности, контролируемые параметры, влияющие на потерю устойчивости откосом массива трещиноватых горных пород. Показано, что устойчивое положение откосного сооружения определяется целым рядом факторов, а не каким-либо одним. Поскольку поведение откосного сооружения в основном определяется несплошностями (трещиноватостью), для исследования устойчивости хорошо подходит метод дискретных элементов (DEM), реализованный в продукте UDEC и FLAC3D компании Itasca.

Метод дискретных элементов, который позволяет смоделировать и проанализировать массив горных пород как несплошную среду, считается перспективным способом моделирования поведения откосов. Он адекватно описывает поведение откосов и хорошо согласуется с реальными наблюдениями [33, 34]. Поскольку массивы горных пород представляют собой блочную среду, разделенную системами трещин, анализировать и прогнозировать устойчивость откосных сооружений в таких массивах целесообразно с помощью DEM.

Для описания прочности массива горной породы (сланца) была применена модель полной трещиноватости вместо стандартного критерия разрушения Мора-Кулона. Модель полной трещиноватости учитывает ориентацию поверхности ослабления в модели Мора-Кулона. В такой модели потеря устойчивости может происходить либо в твердом теле, либо вдоль плоскости ослабления, либо в обоих направлениях, в зависимости от напряженно-деформированного состояния массива, ориентации плоскостей ослабления и свойств горной породы. Следует отметить, что эта модель не учитывает конкретное расположение плоскостей ослабления (в том числе относительно друг друга), а только их ориентацию [35], в чем состоит ограниченность предложенного подхода.

Дополнительные входные параметры для расчета описываются в свойствах модели по результатам полевых исследований (угол падения трещиноватости вкрест простирания уступа 78° , угол трения по поверхности трещин 38°).

Для описания параметров несплошности авторами применен критерий Бёртона-Бендиса. Этот критерий описывает прочностные параметры поверхности трещины и зависит от совокупного влияния шероховатости поверхности, прочности породы на поверхности, приложенного нормального напряжения и величины сдвиговых смещений. Серия сравнительных моделей



между критериями Мора-Кулона и Бёртона-Бендиса для откосных сооружений описана в работе [36].

В качестве дополнительной оценки характеристик устойчивости откосов был выбран критерий деформации как приведенное значение деформации блока породы в уступе. Если в реальных условиях деформационный подход основан на данных мониторинга целевой призмы возможного обрушения (тела возможного оползня для пластичных пород), тогда как в численном моделировании расчет критерия деформации ведется исходя из приведенного значения деформации блока

$$\varepsilon \approx \frac{\Delta\chi}{H} \cdot 100\%,$$

где $\Delta\chi$ – максимальная деформация откоса, м; H – общая высота уступа (откосного сооружения), м.

Пороговые значения критерия деформации по [54] приведены в таблице 2.

Таблица 2. Пороговые значения критерия деформации, соответствующие определенному состоянию уступа

Состояние высокого уступа	Пороговый уровень критерия деформации, %
Появление трещин растяжения	0,1
Прогрессирующие подвижки	0,6
Обрушение	>2,0

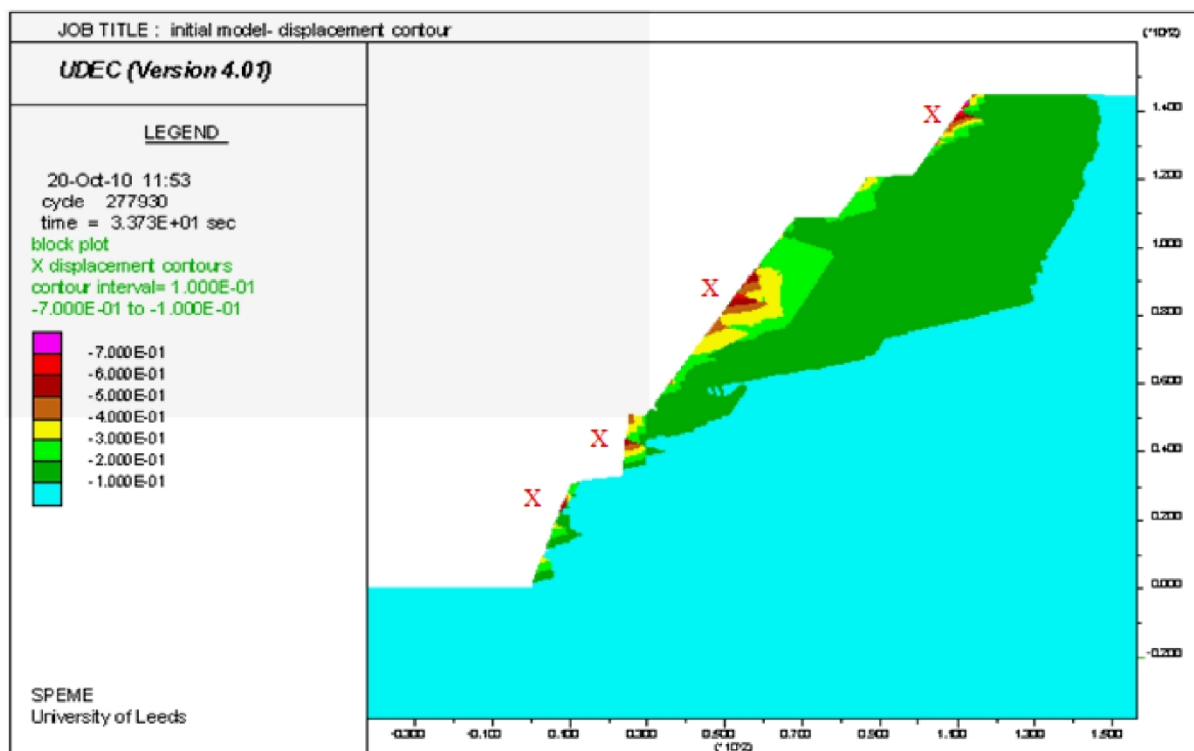


Рис. 7. Раскрытие трещин растяжения (маркеры X) в модели высокого уступа

На рис. 7 показаны зоны с максимальным смещением 0,7 м, которые расположены в отдельных частях откоса (маркеры «X»). В указанных местах критерий деформации откоса составляет 0,47%, что отражает раскрытие трещин растяжения (см. таблицу 2).

В целом, откос, сложенный сланцеватыми трещиноватыми породами, испытывает сложный тип разрушения, выражающийся в отколе блоков по раскрывающимся трещинам сланцеватости, их повороте (опрокидывании), а также в скольжении блоков по поверхностям трещин кливажа (рис. 8).

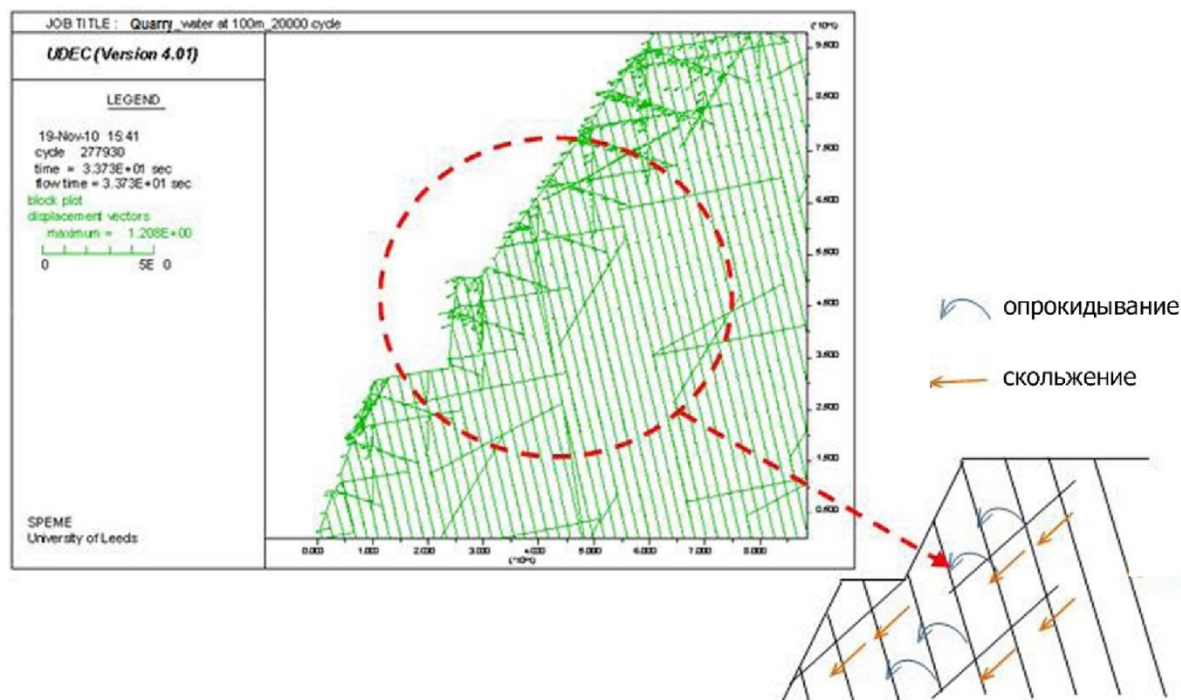


Рис. 8. Векторы перемещения блоков горных пород при деформации уступа

Авторами выявлено, что нарушение устойчивости вызвано сложным механизмом разрушения массива сланцеватых горных пород, включающим отчетливую плоскую поверхность скольжения наряду с блочно-изгибным опрокидыванием блоков породы. Падение трещин, отличное от горизонтального, наличие водоносных горизонтов, выветрелость и величина угла откоса являются определяющими факторами, оказывающими значимое влияние на потерю устойчивости откосными сооружениями. Результаты моделирования показали, что угол падения трещин сланцеватости 78° и обводнение напорными водами являются достаточными условиями для потери устойчивости и обрушения уступа.

Заклучение

С помощью статистических математических моделей сыпучих сред могут быть исследованы практически все структурные свойства, такие как функция радиального распределения и связанная с ней функция радиальной плотности, пористость или плотность заполнения, удельная поверхность всей структуры и отдельных ее компонентов, координационные характеристики пористых структур. При этом числа координации могут быть рассчитаны как в целом по структуре, так и по отдельным ее составляющим. Это позволяет находить общее количество связей в структуре, учитывать их качество, определяемое расстоянием между соседними элементами, найти площадь контакта между элементами массива, охарактеризовать структуру пор, образованных промежутками между элементами смоделированной среды, распределение пор по размерам, а также определить усилия, возникающие на контактах между частицами и определить перемещения частиц друг относительно друга при моделировании разрушения или деформации среды. Некоторые из названных структурных и механических характеристик практически невозможно исследовать экспериментальными методами.

Методы статистического моделирования, конечно-элементные (FEM) и дискретно-элементные (DEM) методы моделирования как раздельнозернистых, так и сплошных сред или трещиноватых массивов горных пород представляют собой достаточно мощный инструмент для исследования их деформационно-прочностных свойств. Также данные методы могут использоваться при создании современных композиционных материалов и техногенных породных массивов с заданными прочностными и деформационными свойствами.



Список источников

1. Кандауров, И.И. Расчет напряженного состояния и осадок оснований с применением цифровых вычислительных машин (Пособие по проектированию) / И.И. Кандауров, Е.М. Аксенов, В.П. Матвеев // Л.: Изд-во литературы по строительству, 1969. – 190 с.
2. Стажевский, С.Б. Приложение механики сыпучих сред к решению некоторых задач механики горных пород // ФТПРПИ. – 1987. – №3. – С.3-18.
3. Ревуженко, А.Ф. О деформировании сыпучей среды // ФТПРПИ. – Ч. I–IV. – 1980. – №3; 1981. – №5; 1982. – №5; 1983. – №6.
4. Ревуженко, А.Ф. Задачи механики сыпучих сред в горном деле / А.Ф. Ревуженко, С.Б. Стажевский, Е.И. Шемякин // ФТПРПИ. – 1982. – №3. – С.19-25.
5. Бобряков, А.П. О временных структурах в процессах формирования сыпучей среды / А.П. Бобряков, В.П. Косых, А.Ф. Ревуженко // ФТПРПИ. – 1990. – №2. – С.29-39.
6. Лавриков, С.Ф. О расчете локализованных течений сыпучей среды в радиальных каналах / С.Ф. Лавриков, А.Ф. Ревуженко // ФТПРПИ. – 1990. – I. – С.3-9.
7. Соколовский, В.В. Статика сыпучей среды. – М.: Физматгиз, 1960.
8. Карнаухов, А.П. Некоторые общие принципы моделирования пористых систем // Моделирование структуры пористых материалов. – Новосибирск: Инст. катализа СО АН, 1976. – С.31-41.
9. Батугин, С.А. Гранулометрия материалов / С.А. Батугин, А.В. Бирюков, Р.М. Кылатчанов. – Новосибирск: Наука, СО АН СССР, 1989. – 173 с.
10. Гриффитс, Дж. Научные основы исследования осадочных пород. – М.: Мир, 1971. – 421 с.
11. Барон, Л.И. Кусковатость и методы ее измерения. – М.: Изд. АН СССР, 1960. – 124 с.
12. Вассоевич, Н.Б. Крупнообломочные породы // Справочное руководство по петрографии осадочных пород. – М.: Гостоптехиздат, 1958. – Т.2. – С.15-73.
13. Гордон, С.С. Структура и свойства тяжелых бетонов на различных заполнителях. – М.: Стройиздат, 1969. – 151 с.
14. Безматерных, В.А. Анализ гранулометрического состава взорванной горной массы / В.А. Безматерных, В.Г. Симаков // Известия вузов. Горный журнал. – 1980. – №6. – С.53-59.
15. Бирюков, А.В. О среднем диаметре кусков взорванной породы / А.В. Бирюков, А.С. Ташкинов // Известия вузов. Горный журнал. – 1987. – №1. – С.55-57.
16. Воробьев, В.А. Применение физико-математических методов в исследовании свойств бетона / В.А. Воробьев, В.К. Кивран, В.П. Корякин. – М.: Высшая школа, 1977. – 271 с.
17. Чмыхалова, В.С. Моделирование частиц дисперсных материалов // Известия вузов. Горный журнал. – 1991. – №1. – С.14-18.
18. Ярцев, В.А. Механическая модель пылевой частицы / В.А. Ярцев, В.К. Рожнева, Н.П. Волков // Известия вузов. Горный журнал. – 1990. – №1. – С.53-55.
19. Зайцев, Ю.В. Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушения. – М.: Стройиздат, 1982. – 196 с.
20. Rubio-Largo, S.M. Granular gas of ellipsoids: analytical collision detection implemented on GPUs / S.M. Rubio-Largo, P.G. Lind, D. Maza, R.C. Hidalgo // Comp. Part. Mech. (2015) 2:127–138. DOI 10.1007/s40571-015-0042-y
21. Tarokh, A. Insights on surface spalling of rock / A. Tarokh, K. Chu-Shu, A. Fakhimi, J.F. Labuz // Comp. Part. Mech. (2016) 3:391–405. DOI 10.1007/s40571-016-0108-5
22. Feng, Y.T. Discrete element modelling of large scale particle systems–I: exact scaling laws / Y.T. Feng, D.R.J. Owen // Comp. Part. Mech. (2014) 1:159–168. DOI 10.1007/s40571-014-0010-y
23. Криксин, Ю.А. О заполнении плотных упаковок шаров разных радиусов. – Препринт Инст. прикл. матем. им. М.В. Келдыша, 1986. – №125. – 28 с.
24. Китайгородский, А.И. Порядок и беспорядок в мире атомов. – М.: Наука, 1984. – 176 с.
25. Потураев, В.Н. О моделировании зернистой среды вычислительными методами / В.Н. Потураев, Ю.Г. Стоян, И.А. Шумек, Л.Д. Пономаренко, В.Г. Санисев // ФТПРПИ. – 1989. – № 2. – С. 3-9.
26. Styles T.D. Numerical Modelling and Analysis of slope stability within fracture dominated rock masses. – Exeter, UK: University of Exeter, 2009. – 321 p.
27. Hart, R.D. An introduction to distinct element modeling for rock engineering / In Hudson (ed.), *Comprehensive Rock Engineering: Principles, Practice & Projects*. Pergamon Press, Oxford, 2 (1993) 245-261.
28. Tkachenko, A.V. Stress Propagation through Frictionless Granular Material / A.V. Tkachenko, T.A. Witten [Электронный ресурс]. – 1998. – Режим доступа: <http://xxx.lanl.gov/abs/cond-mat/9811171>, свободный. – Загл. с экрана.
29. Bagi, K. Geometrical modelling of granular assemblies // Acta Technica Acad. Sci. Hung. –



1995-1996. – Vol. 107. – N 1-2. – PP. 1-16.

30. Bagi, K. Numerical analysis of high-order continua in the description of granular assemblies / K. Bagi, I. Bojtár // *Epites-es epiteszettudomány*. – 1989. – N 1-2. – PP. 75-93.

31. Scholtes, L. Modelling progressive failure in fractured rock masses using a 3D discrete element method / L. Scholtes, F.-V. Donzé // *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 52 (2012) 18–30. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.02.009

32. Abdullah, R. Discrete Element Modelling of Complex Failure Mechanism at Quarry Slope / R. Abdullah, M. Amin, A. Rashid, S. Yahya // *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, 72:3 (2015) 31–39. DOI: 10.11113/jt.v72.4010

33. Tosney, J.R. Verification of a large scale slope instability mechanism at Highland Valley Copper. / J.R. Tosney, D. Milne, A.V. Chance and F. Amon // *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 18:4 (2014) 273–288.

34. Itasca. 2004. UDEC Version 4.01. Minneapolis, Minnesota, USA: Itasca Consulting Group, Inc.

35. Abdullah, R.A. Selecting shear strength models for joints - experience with modelling of complex rock slope failure in UDEC / R.A. Abdullah, R.J. Fowell, W. Murphy // *Proceedings of the European Rock Mechanics Symposium, EUROCK 2010: Rock Mechanics in Civil and Environmental Engineering*. Switzerland: Taylor & Francis Group. 543–546.

36. Brox, D. Utilizing strain criteria to predict highwall stability performance / D. Brox, W. Newcomen // *Proceedings of the 10th Congress of the International Society for Rock Mechanics: ISRM 2003 – Technology Roadmap for Rock Mechanics*, South African Institute of Mining and Metallurgy. 157–161.

References

1. Kandaurov, I.I. Raschet napryazhennogo sostoyaniya i osadok osnovaniy s primeneniym tsifrovyykh vychislitel'nykh mashin (Posobiye po proyektirovaniyu) / I.I. Kandaurov, Ye.M. Aksenov, V.P. Matveyev // L.: Izd vo literatury po stroitel'stvu, 1969. – 190 s.

2. Stazhevskiy, S.B. Prilozheniye mekhaniki sypuchikh sred k resheniyu nekotorykh zadach mekhaniki gornyykh porod // *FTPRPI*. – 1987. – №3. – S.3-18.

3. Revuzhenko, A.F. O deformirovani sypuchey sredy // *FTPRPI*. – CH. I–IV. – 1980. – №3; 1981. – №5; 1982. – №5; 1983. – №6.

4. Revuzhenko, A.F. Zadachi mekhaniki sypuchikh sred v gornom dele / A.F. Revuzhenko, S.B. Stazhevskiy, Ye.I. Shemyakin // *FTPRPI*. – 1982. – №3. – S.19-25.

5. Bobryakov, A.P. O vremennykh strukturakh v protsessakh formirovaniya sypuchey sredy / A.P. Bobryakov, V.P. Kosykh, A.F. Revuzhenko // *FTPRPI*. – 1990. – №2. – S.29-39.

6. Lavrikov, S.F. O raschete lokalizovannykh techeniy sypuchey sredy v radial'nykh kanalakh / S.F. Lavrikov, A.F. Revuzhenko // *FTPRPI*. – 1990. – I. – S.3-9.

7. Sokolovskiy, V.V. Statika sypuchey sredy. – M.: Fizmatgiz, 1960.

8. Karnaukhov, A.P. Nekotoryye obshchiye printsipy modelirovaniya poristyykh sistem // *Modelirovaniye struktury poristyykh materialov*. – Novosibirsk: Inst. kataliza SO AN, 1976. – S.31-41.

9. Batugin, S.A. Granulometriya materialov / S.A. Batugin, A.V. Biryukov, R.M. Kylatchanov. – Novosibirsk: Nauka, SO AN SSSR, 1989. – 173 s.

10. Griffiths, Dzh. Nauchnyye osnovy issledovaniya osadochnyykh porod. – M.: Mir, 1971. – 421 s.

11. Baron, L.I. Kuskovatost' i metody yeye izmereniya. – M.: Izd. AN SSSR, 1960. – 124 s.

12. Vassoyevich, N.B. Krupnooblomochnyye porody // *Spravochnoye rukovodstvo po petrografii osadochnyykh porod*. – M.: Gostoptekhizdat, 1958. – T.2. – S.15-73.

13. Gordon, S.S. Struktura i svoystva tyazhelykh betonov na razlichnykh zapolnitelyakh. – M.: Stroyizdat, 1969. – 151 s.

14. Bezmaternyykh, V.A. Analiz granulometricheskogo sostava vzorvannoy gornoy massy / V.A. Bezmaternyykh, V.G. Simakov // *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. – 1980. – №6. – S.53-59.

15. Biryukov, A.V. O srednem diametre kuskov vzorvannoy porody / A.V. Biryukov, A.S. Tashkinov // *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. – 1987. – №1. – S.55-57.

16. Vorob'yev, V. A. Primeneniye fiziko-matematicheskikh metodov v issledovanii svoystv betona / V.A. Vorob'yev, V.K. Kivran, V.P. Koryakin. – M.: Vysshaya shkola, 1977. – 271 s.

17. Chmykhalova, V.S. Modelirovaniye chastits dispersnykh materialov // *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. – 1991. – №1. – S.14-18.

18. Yartsev, V.A. Mekhanicheskaya model' pylevoy chastitsy / V.A. Yartsev, V.K. Rozhneva, N.P. Volkov // *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. – 1990. – №1. – S.53-55.

19. Zaytsev, Yu.V. Modelirovaniye deformatsiy i prochnosti betona metodami mekhaniki razrusheniya. – M.: Stroyizdat, 1982. – 196 s.



20. Rubio-Largo, S.M. Granular gas of ellipsoids: analytical collision detection implemented on GPUs / S.M. Rubio-Largo, P.G. Lind, D. Maza, R.C. Hidalgo // *Comp. Part. Mech.* (2015) 2:127–138. DOI 10.1007/s40571-015-0042-y
21. Tarokh, A. Insights on surface spalling of rock / A. Tarokh, K. Chu-Shu, A. Fakhimi, J.F. Labuz // *Comp. Part. Mech.* (2016) 3:391–405. DOI 10.1007/s40571-016-0108-5
22. Feng, Y.T. Discrete element modelling of large scale particle systems–I: exact scaling laws / Y.T. Feng, D.R.J. Owen // *Comp. Part. Mech.* (2014) 1:159–168. DOI 10.1007/s40571-014-0010-y
23. Kriksin, Yu.A. O zapolnenii plotnykh upakovok sharov raznykh radiusov. – Preprint Inst. prikl. matem. im. M.V. Keldysha, 1986. – №125. – 28 s.
24. Kitaygorodskiy, A.I. Poryadok i besporyadok v mire atomov. – M.: Nauka, 1984. – 176 s.
25. Poturayev, V.N. O modelirovani zernistoy sredy vychislitel'nymi metodami / V.N. Poturayev, Yu.G. Stoyan, I.A. Shumek, L.D. Ponomarenko, V.G. Sanisev // *FTPRPI*. – 1989. – № 2. – S. 3-9.
26. Styles T.D. Numerical Modelling and Analysis of slope stability within fracture dominated rock masses. – Exeter, UK: University of Exeter, 2009. – 321 p.
27. Hart, R.D. An introduction to distinct element modeling for rock engineering / In Hudson (ed.), *Comprehensive Rock Engineering: Principles, Practice & Projects*. Pergamon Press, Oxford, 2 (1993) 245-261.
28. Tkachenko, A.V. Stress Propagation through Frictionless Granular Material / A.V. Tkachenko, T.A. Witten [Электронный ресурс]. – 1998. – Режим доступа: <http://xxx.lanl.gov/abs/cond-mat/9811171>, свободный. – Загл. с экрана.
29. Bagi, K. Geometrical modelling of granular assemblies // *Acta Technica Acad. Sci. Hung.* – 1995-1996. – Vol. 107. – N 1-2. – PP. 1-16.
30. Bagi, K. Numerical analysis of high-order continua in the description of granular assemblies / K. Bagi, I. Bojtár // *Epites-es epiteszettudomany*. – 1989. – N 1-2. – PP. 75-93.
31. Scholtes, L. Modelling progressive failure in fractured rock masses using a 3D discrete element method / L. Scholtés, F.-V. Donzé // *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 52 (2012) 18–30. DOI: [dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.02.009](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.02.009)
32. Abdullah, R. Discrete Element Modelling of Complex Failure Mechanism at Quarry Slope / R. Abdullah, M. Amin, A. Rashid, S. Yahya // *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, 72:3 (2015) 31–39. DOI: 10.11113/jt.v72.4010
33. Tosney, J.R. Verification of a large scale slope instability mechanism at Highland Valley Copper. / J.R. Tosney, D. Milne, A.V. Chance and F. Amon // *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 18:4 (2014) 273–288.
34. Itasca. 2004. UDEC Version 4.01. Minneapolis, Minnesota, USA: Itasca Consulting Group, Inc.
35. Abdullah, R.A. Selecting shear strength models for joints - experience with modelling of complex rock slope failure in UDEC / R.A. Abdullah, R.J. Fowell, W. Murphy // *Proceedings of the European Rock Mechanics Symposium, EUROCK 2010: Rock Mechanics in Civil and Environmental Engineering*. Switzerland: Taylor & Francis Group. 543–546.
36. Brox, D. Utilizing strain criteria to predict highwall stability performance / D. Brox, W. Newcomen // *Proceedings of the 10th Congress of the International Society for Rock Mechanics: ISRM 2003 – Technology Roadmap for Rock Mechanics*, South African Institute of Mining and Metallurgy. 157–161.

Авторы

Гоголин В.А. – доктор техн. наук, профессор
Лесин Ю.В. – доктор техн. наук, профессор
Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева

Authors

Vyacheslav A. Gogolin, Dr. Sc. (Tech.)
Yury V. Lesin, Dr. Sc. (Tech.)
T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

Библиографическое описание статьи

Гоголин, В.А. Обзор методов исследования структурных и физико-механических параметров зернистых сред / В.А. Гоголин, Ю.В. Лесин // *Техника и технология горного дела*. – 2018. – № 3 (3). – С. 42-55.

Cite this article

Gogolin V.A., Lesin Yu.V. (2018) Review of the Research Methods of Structural, Physical and Mechanical Parameters of Granular Media, *Journal of mining and geotechnical engineering*, 3(3):42.