

## Численный расчет устойчивости массива с жидкофазными включениями

Шиповский И.Е., Трофимов В.А.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, Москва

Решение задач механики горной инженерии при проведении работ в дисперсных геологических средах в случае присутствия в массивах породы включений жидкой или пульпообразной фазы является важным направлением в математическом моделировании процессов технологии добычи и транспортировки сырья при разработке полезных ископаемых. Развитие выработочного пространства и размещение тяжелого оборудования или иных инженерных сооружений на дневной поверхности может привести к масштабным деформациям вплоть до катастрофического обрушения, связанного как со сползанием откосов, так и с провалом над выработкой [1].

Напряженно-деформированное состояние массива определяется численно компьютерным методом сглаженных частиц (SPH) [1-3].

В численном анализе использовалась двумерная модель, включающая области с различными прочностными и фазовыми характеристиками. Рассчитанные результаты показывают структурные сдвиги и пиковые ускорения грунта при техногенных воздействиях. Кроме того, динамический отклик массива был дополнительно исследован путем анализа сейсмической энергии Гильберта.

Отметим, что при численном моделировании масштабного обрушения на начальном этапе формируется типичная картина сдвига в виде крупных блоков породы, характерных для инженерных методов расчета устойчивости, в которых рассматривается силовое равновесие отдельных блоков, задаваемых, однако априори. При дальнейшем деформировании происходит хаотичное разрушение блоков на мелкие фрагменты, осыпающиеся по вновь формирующимся разломам.

Использованный метод позволяет установить взаимосвязь между действующими на дневной поверхности нагрузками и деформационно-прочностными свойствами пород массива в его критическом состоянии для конкретного строения массива и имеющимися в его толще включениями и пустотами.

Деформационные процессы описываются системой уравнений механики сплошной среды, которая включает уравнения неразрывности, движения и энергии [1, 2, 3].

Замыкают систему уравнений определяющие соотношения, которые конкретизируют поведение среды, задавая связи между тензорами напряжений и деформаций. Для описания процессов деформации горных пород за пределом упругости используются различные модификации модели пластичности. В частности, соотношения модифицированной модели Друккера-Прагера. Пластической деформацией считается любая неупругая деформация независимо от ее природы. Напряженное состояние среды определяется согласно закону Гука.

Замкнутая система квазилинейных дифференциальных уравнений модели в частных производных с заданными начальными и граничными условиями полностью определяют краевую задачу, которая решается численно с использованием метода сглаженных частиц [1]. Выбор данного метода определяется его консервативностью и хорошей устойчивостью при решении задач геомеханики, и тем, что включает в себя все необходимые алгоритмы учета разрушения при нагружении.

Использованный метод позволяет установить взаимосвязь между нагрузкой на поверхность отвала и деформационно-прочностными свойствами пород в его критическом состоянии для конкретного строения отвала и приложенной нагрузки. Тем самым определяются допустимые границы функционирования технологической схемы работ на отвале. Рисунок 1 показывает расчет изменения во времени состояния массива отвала хвостового и шламохранилища с пульпообразным включением при расположении на поверхности тяжелого оборудования или инженерных сооружений

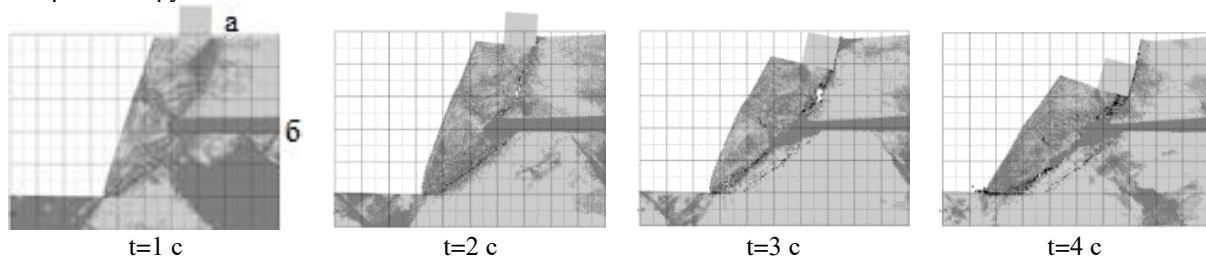


Рис. 1. Расчет развитие разрушения откоса отвала

*а* – технологическое оборудование массой; *б* – область, занятая пульпообразной жидкой массой.

Проведенные расчеты позволяют уверенно констатировать тот факт, что наличие пульпообразных включений в массиве отвала существенно снижает его несущую способность вне зависимости от расположения включения, и дают возможность количественно оценить ослабление массива.

Рассмотрение процесса обрушения карстообразной полости в толще дна водоема позволяет оценить параметры волнообразования

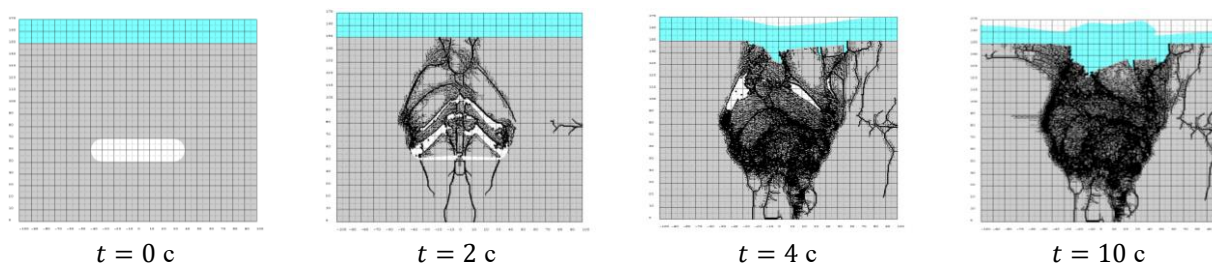


Рис. 2. Рассчитанные картины обрушения свода карстовой пещеры под дном водоема с волнообразованием на водной поверхности.

На рис. 2 показаны в последовательные моменты времени рассчитанные изменения в условиях силы тяжести состояния свода карстовой пещеры. Здесь хорошо видно, что блоковое разрушение породы массива приводит к обрушению кровли и схлопыванию полости пещеры. Эти процессы вызывают существенное волнообразование на поверхности водоема. Высота волны достигает значений порядка 10 м.

Таким образом, можно сделать вывод, что используемый метод сглаженных частиц позволяет выполнять прямое моделирование развития деформаций и разрушений горной массы с жидкими включениями и дают возможность количественно оценить ослабление массива и характеристики волнообразования.

## Список литературы

- [1] Захаров В.Н., Малинникова О.Н., Трофимов В.А., Шиповский И.Е. Моделирование влияния пульпообразных масс в толще отвала на динамику развития оползневых зон // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. Т. 1 2020. С. 359-378
- [2] Trofimov V.A., Shipovskii I.E., Malinnikova O.N, Wen-Jie Xu, Numerical Ap-proach to Computer Simulation of Landslid Events, // AIP Conference Proceedings of the International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures, 2019, Tomsk, Russia, p. 020329-1 - 020329-8.
- [3] Малинникова О.Н., Трофимов В.А., Шиповский И.Е. Моделирование влияния мультифазных включений в толще отвала на устойчивость откосов // Материалы VII Российской конференции с международным участием «Многофазные системы: модели, эксперимент, приложения». Уфа, 2020. С.63.