УДК 622.233

РАЗРАБОТКА АНАЛИТИКО-ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ

Понкратьева В.Э., студент гр. АРм-241, Кузнецов И.С., доцент к.т.н.,
научный руководитель
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева
Россия, г. Кемерово

Разработка аналитико-имитационной модели буровзрывных работ (БВР) представляет собой важный этап в оптимизации вскрышных процессов при открытой разработке полезных ископаемых.

Основная цель построения такой модели — формализация и воспроизведение в виртуальной среде всех ключевых процессов, происходящих на стадии бурения и взрыва горной массы, с целью оценки влияния различных параметров на конечный результат и выбора оптимальных технологических решений.

Аналитико-имитационная модель представляет собой совокупность математических уравнений, алгоритмов и эмпирических зависимостей, описывающих процессы разрушения горной породы, распространения ударных волн, распределения энергии взрыва, формирования кусковатости, вибрационного воздействия, затрат времени и ресурсов на выполнение буровзрывных операций.

Такая модель сочетает два подхода:

1. Аналитический, основанный на известных физических и механических законах (например, теория прочности материалов, механика разрушения, газодинамика).

2. Имитационный, основанный на численном моделировании, статистических данных и приближённых расчетах, воспроизводящих реальные технологические процессы с учётом их вероятностного характера.

Модель позволяет выполнять прогнозные расчёты, оценивать последствия изменения отдельных параметров (диаметра скважин, длины зарядов, сетки бурения, типа взрывчатки, задержек и т. д.), а также выявлять неэффективные звенья в технологической цепочке буровзрывных работ.

Этапы построения аналитико-имитационной модели. Разработка модели включает несколько последовательных этапов:

1. Сбор и анализ исходных данных:

- геологические характеристики массива (плотность, прочность, трещиноватость, слоистость);

- геометрия уступов (высота, ширина, угол откоса);

- текущие параметры буровзрывных работ (диаметр, глубина и количество скважин, сетка бурения, тип ВВ);

- характеристика взрывчатых веществ (скорость детонации, энергия, плотность, чувствительность);

- производственные показатели (выход крупности, объём выброса, производительность экскавации);

экологические и сейсмические требования.

2. Формализация процессов и построение уравнений:

- уравнения для расчёта энерго-потенциала ВВ;

- модели распределения энергии в массиве;

- расчёт радиуса разрушения и трещиноватости;

- оценка фракционного состава породы;

- моделирование распространения ударных и сейсмических волн;

- временные задержки взрывов и их влияние на направленное разрушение массива.

3. Выбор программного инструментария:

На этом этапе подбираются программные решения, позволяющие реализовать аналитико-имитационную модель.

Это могут быть:

- специализированные программы: JKSimBlast, BlastMaker, SURPAC Blast, AutoDyn, ANSYS, RockWare, FLAC3D, UDEC, Maptek Vulcan;

- универсальные системы моделирования: MATLAB, Simulink, Python (SciPy, NumPy);

- геоинформационные системы (ГИС) для интеграции пространственных данных и геологических моделей.

4. Калибровка и верификация модели:

Имитационная модель калибруется по фактическим данным, полученным на конкретном карьере: фрагментация породы, сейсмическое воздействие, форма воронки взрыва, расход ВВ, производительность экскаваторов и т. д. Полученные результаты сравниваются с расчётными значениями, при необходимости в модель вносятся коррективы.

5. Анализ чувствительности модели:

Проводится серия имитационных экспериментов по варьированию ключевых параметров, таких как:

- диаметр скважин;

- сетка бурения;

- тип и плотность зарядов;

- задержки между взрывами;

- глубина зарядки и свободный объём.

Результаты анализа позволяют определить чувствительность производственного результата к изменению каждого параметра, выявить наиболее критичные факторы и заложить основу для последующей оптимизации.

Преимущества аналитико-имитационного подхода. Использование аналитико-имитационных моделей в буровзрывном деле обеспечивает ряд важных преимуществ:

1. Снижение затрат: позволяет рассчитать оптимальный расход буровзрывных материалов и трудозатрат без проведения множества полевых испытаний.

2. Повышение точности прогнозов: обеспечивается за счёт учёта большого количества переменных и адаптации модели под конкретные условия месторождения.

3. Экологическая безопасность: позволяет заранее рассчитать зоны допустимого сейсмического воздействия и минимизировать ущерб.

4. Гибкость: легко адаптируется под различные технологии, типы горных пород, конструкции зарядов и оборудования.

5. Повышение безопасности: за счёт моделирования потенциально опасных сценариев и предотвращения нештатных ситуаций.

Перспективы развития аналитико-имитационного моделирования. Современные тенденции в области цифровизации горной промышленности открывают новые горизонты в развитии аналитико-имитационного моделирования.

В частности, актуальными являются направления:

- интеграция моделей в состав цифровых двойников карьеров;
- применение искусственного интеллекта и машинного обучения для прогнозирования результатов взрывов;
- использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для сбора данных о профиле уступов и поствзрывной ситуации;
- визуализация взрывных процессов в 3D и VR-средах;
- автоматизация процесса корректировки параметров БВР в реальном времени.

Аналитико-имитационная модель буровзрывных работ является мощным инструментом, обеспечивающим научно обоснованный и практико-ориентированный подход к оптимизации вскрышных операций. Она позволяет учитывать специфику конкретного месторождения, снижать производственные издержки и повышать безопасность горных работ. Эффективность внедрения таких моделей в практику подтверждена как научными исследованиями, так и результатами промышленной эксплуатации на современных предприятиях горной отрасли.

Список литературы:

1. Лукьянов В.Г. Взрывные работы: учебник для вузов / В.Г. Лукьянов, В.И. Комащенко, В.А. Шмурыгин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, – 404 с. IX Международная научно-практическая конференция – Кемерово: КузГТУ, 2025. – (дата обращения 10.11.2025)