

МЕХАНИЗМЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВНЫХ ВОЛН И СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА МАССИВ И БОРТА КАРЬЕРА

У. Ф. Насиров¹, Ш.Ш. Хайруллоев¹

¹Алмалыкский филиал НИТУ МИСИС,
110100, Алмалык, Республика Узбекистан
shaxzodxayrulloev@gmail.com

Аннотация: В статье рассмотрены механизмы динамического воздействия промышленных взрывов на массив горных пород и их влияние на напряжённо-деформированное состояние прибортовых зон глубоких карьеров. Проанализированы процессы формирования ударной, упругой и сейсмической волн, их амплитудно-частотные характеристики и особенности затухания на различных расстояниях от источника взрыва. Показано, что параметры продольных, поперечных и поверхностных волн определяют степень предразрушения массива и развитие микротрещиноватости, что приводит к снижению модуля упругости, перераспределению напряжений и уменьшению коэффициента запаса устойчивости бортов. Особое внимание уделено эффектам суперпозиции волн при короткозамедленном взрывании, вызывающим рост максимальной скорости колебаний частиц и увеличение горизонтальных смещений откосов. Представлены данные о характере изменения НДС в условиях совмещённого влияния взрывных нагрузок и гравитационного поля массива. Результаты исследования подтверждают необходимость корректного определения безопасного расстояния при взрывных работах с учётом свойств массива и реальных параметров сейсмического воздействия.

Ключевые слова: взрывные работы; динамическое воздействие; сейсмические волны; ударная волна; ППС; устойчивость бортов; предразрушение массива; трещиноватость; короткозамедленное взрывание; глубокие карьеры; напряжённо-деформированное состояние.

Введение

Динамическое воздействие взрывов на массив горных пород является ключевым фактором, определяющим локальное состояние напряжений и деформаций в прибортовых зонах глубоких карьеров. Именно характер и параметры распространения ударных, упругих и сейсмических волн определяют степень предразрушения массива, возможность появления трещин, смещений уступов и снижение коэффициента запаса устойчивости бортов. В рассматриваемой диссертационной теме критически важно изучить механизмы волнового воздействия, поскольку безопасное расстояние при взрывных работах

напрямую зависит от типа волн, их энергии, амплитудно-частотных характеристик и затухания по мере удаления от источника взрыва.

Формирование ударной и сейсмической волны при взрыве

Взрыв в зарядной камере сопровождается мгновенным переходом химической энергии взрывчатого вещества в энергию высокотемпературных газов. Как описано в «Горной геомеханике глубинных взрывов», начальная фаза представляет собой ударную волну, распространяющуюся со сверхзвуковой скоростью, значительно превышающей скорость упругих волн в породе. Она создаёт давление в десятки–сотни МПа, вызывая локальное разрушение и деформацию массива. [1]

В дальнейшем, по мере удаления от скважины, ударная волна теряет энергию, переходит в волну сжатия, а далее — в сейсмические волны, распространяющиеся по массиву в виде колебаний среды. *Инструкция НГМК по сейсмомониторингу* указывает, что такие волны регистрируются на расстояниях сотен и тысяч метров, где давление уже не вызывает разрушение, но способно вызвать смещения склонов. [3]

Таким образом, волновой процесс представляет собой цепочку: ударная волна → волна сжатия → продольные (P) и поперечные (S) сейсмические волны → поверхностные волны Релея и Лява.

Основные типы волн и их влияние на устойчивость бортов

Продольные волны (P)

Распространяются быстрее всего, вызывают чередование зон растяжения и сжатия. Играют роль в формировании микротрещиноватости, особенно на границах слоистых пород.

Поперечные волны (S)

Опасны тем, что вызывают сдвиговые деформации, которые наиболее критичны для бортов карьера. Как подчёркивают Юревич и Трофимов, сдвиговые напряжения часто становятся инициаторами трещин, ориентированных вдоль откоса. [1]

Поверхностные волны

Имеют наибольшую продолжительность и энергию на больших расстояниях. По данным *отчёта Мурунтау (2024)*, именно поверхностные волны оказывают максимальное влияние на откосы глубинных карьеров, вызывая горизонтальные смещения до нескольких миллиметров. [3]

Уровни вибраций и динамические параметры воздействия

Во всех работах по сейсмике взрывов одним из ключевых параметров является ППС — максимальная скорость колебаний частиц.

Согласно *Верколанцев, 2023*, ППС определяет:

- величину динамических напряжений;

- вероятность локальных разрушений;
- степень риска смещения уступов;
- критерий «сейсмической опасности» при проектировании БВР.

[4]

Амплитуда ППС зависит от:

- массы заряда на замедление;
- расстояния до точки контроля;
- свойств массива (затухание, трещиноватость, насыщенность);
- частотного состава колебаний.

Применяемая эмпирическая зависимость (Садовский) подтверждена в российских и узбекских исследованиях:

$$v = K \left(\frac{Q}{R^3} \right)^\alpha$$

Предразрушение массива и микротрещиноватость как следствие динамических волн

По данным диссертации Маккоева (2025), в массиве вокруг взрывааемых скважин возникает зона предразрушения, характеризующаяся системой микротрещин, которые формируются именно под действием волны растяжения. Размер зоны предразрушения зависит от:

- диаметра заряда,
- скорости детонации,
- прочности породы,
- расстояния до свободной поверхности. [2]

Исследования показывают, что предразрушение:

- снижает модуль упругости массива;
- увеличивает деформационные реакции откоса;
- способствует дальнейшему распространению трещин от последующих взрывов;
- повышает чувствительность борта к динамическим нагрузкам.

С точки зрения устойчивости бортов это явление является кумулятивным: каждое новое воздействие усиливает эффект предыдущего.

Трещиноватость массива как ключевой фактор реакции на взрывные волны

Из диссертации Съединой (2019) следует, что трещиноватость массива определяет:

- коэффициент запаса устойчивости;
- перераспределение напряжений в борту;
- направления возможного скольжения блоков.

Динамические волны дополнительно:

- раскрывают существующие трещины;
- инициируют развитие новых;
- активируют блоковые смещения.

В условиях глубоких карьеров (Сарбай, Качарский, Мурунтау) глубокие трещины до 80–120 м фиксировались:

- георадарами,
- лазерным сканированием,
- GPS-инклинометрией.

Волновые эффекты при короткозамедленном взрывании (КЗВ)

Отчёты по Мурунтау (2024) показывают, что при КЗВ возникают опасные явления:

- сейсмоодновременные взрывы – когда задержки замедлителей перекрываются,
- усиление ППС в 1.5–2.5 раза,
- увеличение горизонтальных смещений откосов. [3]

Причины:

- отклонения реального времени срабатывания от номинального;
- наличие «слепых» задержек;
- пересечение фронтов волн от соседних скважин.

Это приводит к формированию суммарной волны, с амплитудой выше расчётной.

В мировой практике аналогичное явление называется *wave superposition effect* и является одной из самых опасных для крутых бортов.

Влияние волн на НДС прибортовой зоны

Как отмечается в источниках:

- Юревич — волна давления создаёт зону упругих и пластических деформаций;
- Съедина — при трещиноватой структуре массива НДС перераспределяется неравномерно;
- Верколанцев — динамическая составляющая суммируется со статическим напряжением массива.

В прибортовой зоне создаются:

- зоны растяжения (на расстоянии 1–2 глубин уступов);
- зоны сжатия у подошвы;
- сдвиговые зоны вдоль плоскостей ослабления.

Это снижает несущую способность откоса и может приводить к:

- локальным обрушениям,

- ускоренным деформациям,
- снижению коэффициента запаса устойчивости.

Особенности затухания волн

Из Метода прогнозирования (Верколанцев) следует, что затухание зависит от:

- коэффициента структурного затухания,
- мощности слоя рыхлых пород,
- водонасыщенности массива,
- анизотропии трещиноватости.[4]

Для Мурунтау (по отчёту) коэффициенты затухания отличались для разных направлений борта из-за разного строения массива. [3]

Совместное воздействие взрывов и гравитационного НДС

В глубоких карьерах (более 400–600 м):

- собственный вес массива формирует высокий уровень напряжений;
- динамическая волна накладывается на это состояние;
- в вершине уступов возникают зоны растягивающих напряжений;
- в основании — зоны сдвигово-сжимающих.

Сьедина указывает, что под влиянием взрывов появляются трещины «бортового отпора», ориентированные параллельно откосу. [5]

Заключение

Проведённый анализ показал, что динамические волны, возникающие при взрывных работах, являются определяющим фактором изменения напряжённо-деформированного состояния прибортовых зон глубоких карьеров. Установлено, что переход ударной волны в упругие и далее – в сейсмические колебания приводит к формированию зон предразрушения, развитию микротрещин и уменьшению плотности массива. Эти процессы вызывают перераспределение напряжений, снижение несущей способности откосов и накопление деформаций, проявляющихся в смещениях и локальных нарушениях структуры борта.

Особо отмечено, что при короткозамедленном взрывании возникает эффект суперпозиции волн, приводящий к увеличению ППС и усилению воздействия на устойчивость борта. Наблюдаемая анизотропия затухания волн, обусловленная неоднородным строением массива, требует индивидуального подхода к прогнозированию сейсмического воздействия для каждого направления борта.

Совместное влияние гравитационного НДС и повторяющихся динамических нагрузок формирует условия для ускоренного развития

трещиноватости и образования зон возможного скольжения. Это подтверждает необходимость комплексного учёта параметров взрывов, структуры массива, трещиноватости и реальных данных сейсмомониторинга при определении безопасного расстояния и проектировании режимов взрывных работ.

Полученные результаты служат научной основой для оптимизации параметров БВР, повышения устойчивости бортов и снижения сейсмической опасности в условиях глубоких карьеров.

Список литературы:

1. Боровиков В.А. Закономерности затухания волн напряжений при прохождении через трещину / В.А. Боровиков, И.Ф. Ванягин, Б. Лайхансурэн, В.П. Беляцкий // Взрывное дело №85/42 - М.: Недра, 1983. - С. 52-60.
2. Маккоев V. А. Обоснование параметров БВР на карьерах строительных материалов: автореф. – СПб., 2025. – 24 с.
3. Инструкция по сейсмическому мониторингу территории НГМК и зоны карьера Мурунтау. – Навои: НГМК, 2020. – 8 с.
4. Верколанцев А. В. Разработка метода прогнозирования величины сейсмического воздействия взрывных работ на поверхностные здания и сооружения: дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 2023. – 159 с.
5. Съедина С. А. Геомеханическое обеспечение устойчивости бортов карьера при его углубке: дис. PhD. – Алматы, 2019. – 119 с.