



СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К СНИЖЕНИЮ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВОВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ БОРТОВ КАРЬЕРОВ

У. Ф. Насиров,
Ш.Ш. Хайруллоев,
З.Ж. Каршибоев
Д.А. Хидиров
У.М. Исмаилов

¹Алмалыкский филиал НИТУ МИСИС, 110100, Алмалык, Республика
Узбекистан

²АО НГМК Рудник «Мурунтау», Республика Узбекистан

³Нукусский государственный технический университет, Нукус, Республика
Узбекистан, Каракалпакстан

shaxzodxayrulloev@gmail.com

Аннотация В работе рассмотрены современные методы обеспечения сейсмической безопасности при проведении массовых взрывов в глубоких карьерах (до 1000–1200 м). Проанализированы международные и отечественные нормативы предельно допустимых скоростей колебаний частиц (ППС), включая стандарты AS 2187 (Австралия), HKGS (Китай) и нормативы стран СНГ. Показано влияние параметров короткозамедленного взрывания (КЗВ), типа взрывчатых веществ, интервалов замедления и точности детонаторов на формирование сейсмического отклика массива. На основе данных карьеров Мурунтау, Качарского разреза, Чукикаматы и Бингем-Каньона приведены примеры реального снижения ППС и повышения устойчивости откосов. Представлены инженерно-геотехнические мероприятия (предвзрывание, трещинообразующие сети, анкеровка, бермы), а также возможности адаптивных систем управления, использующих результаты инструментального мониторинга (сейсмостанции, радар-интерферометрия, LIDAR). Показано, что комбинированное применение технологических и геотехнических решений, совместно с обратной связью по результатам наблюдений, обеспечивает снижение ППС на 30–50 % и повышает устойчивость бортов глубоких карьеров.

Ключевые слова: вибрации взрывов; короткозамедленное взрывание; устойчивость откосов; ППС; безопасное расстояние; глубокие карьеры; сейсмический мониторинг; инженерно-геотехническая защита; массовые



взрывы; адаптивное управление БВР.

Введение

Последние годы характеризуются увеличением глубины открытых карьеров (до 1000–1200 м) и ужесточением требований к сейсмической безопасности. Изучены мировые практики: так, крупнейшие разрезы (Например, Бингем-Каньон – 1200 м, Чукикамата – 850 м) известны своими специализированными схемами заряжания и мониторинга. Международные нормативы (AS 2187 в Австралии, HKGS в Китае) рекомендуют предельно допустимые скорости частиц грунта (ППС) порядка 25–50 мм/с; для типичных сооружений принято ориентир ≈ 25 мм/с, при 50 мм/с повреждения маловероятны.

В СНГ проектные регламенты (например, для казахстанских карьеров) оценивают сейсмоопасность в баллах MSK (до 7 баллов от взрывов), вводят ограничения на одновременные взрывы и требуют инструментального мониторинга.

Инженерные и геотехнические методы снижения вибраций

Ключевым приемом является контролируемое взрывание с коротким замедлением (КЗВ). Этот подход обеспечивает разброс детонации зарядов во времени, что снижает амплитуду одиночного импульса и уменьшает интерференцию волн. Оптимальные интервалы замедления выбирают исходя из акустических свойств пород: для рыхлых пород применяют большие задержки (≈ 50 – 90 мс), для крепких – меньшие (≈ 15 – 50 мс). В карьере Мурунтау (Узбекистан) обоснованы конкретные интервалы: в породах средней крепости рекомендуются задержки ≈ 109 и 67 мс, в очень крепких – ≈ 67 и 42 мс. Низкая точность неэлектрических детонаторов (НСИ) приводит к случайному укрупнению групп заряда, что может вызывать «сейсмоодновременные» взрывы большего объема и усиленное сейсмоактивное воздействие. Контроль схемы инициирования (например, электронные детонаторы с малым разбросом по времени) и поэтапное заряжание уменьшает эффект кумуляции.

Геотехнические меры включают предварительное расслаивание – предвзрывание (пресгладка сетью скважин вдоль бока) и массивную протрассировочную сеть, которые создают контролируемую трещинную поверхность и поглощают часть вибраций. Укрепление берм, создание искусственных уступов и дренажных систем, анкерами и сетками снижает подвижность откоса. Таблица 1 иллюстрирует рекомендуемые интервалы замедления НСИ в зависимости от прочности пород в карьере Мурунтау



(категория по шкале Протодяконова f).

Прочность пород (f) Интервал замедления НСИ между рядами / скважинами, мс (рекомендуемое)

6–10 (средняя) 109 мс / 67 мс

10–15 (высокая) 67 мс / 42 мс

Таблица 1. Рекомендуемые интервалы замедления при КЗВ в зависимости от прочности пород.

Параллельно применяются технологии мягкой выемки: ограниченно-взрывное разрушение уступов, водонапорные и воздушные замки в скважинах (глубокое зарядка со свободным объёмом) для удлинения импульса. Выбор ВВ с низкой скоростью детонации и большим газовыделением (например, «игданит» в сравнении с аммонитом) также снижает ударную нагрузку: у «игданита» взрывной импульс ≈ 8 раз более растянут, что даёт большую энергию на рыхление и меньше – на образование ударной волны. Дробные заряды малого диаметра с увеличенным объёмом тампонажа создают более «мягкое» воздействие: амплитуда волны быстрее спадает с расстоянием.

Организационные методы заключаются в регламентации бортовых взрывов: разделении работ на отдельные циклы (нап. подковообразные или линейные взрывы), использовании замыкающих взрывов в технологических схемах, графиках взрывов, исключающих одновременное взрывание слишком больших блоков. Важна строгая привязка к наблюдательным зонам: выпуск предупреждений, приостановка взрывов при неудовлетворительных показателях. Внедряется и адаптивное управление – оперативный пересмотр параметров БВР по результатам предыдущих замеров и мониторинга (например, по измеренной ППС).

Методы расчёта безопасных параметров БВР

Оценка безопасного расстояния или заряда традиционно базируется на эмпирических формулах. Так, для одиночного заряда используется формула Садовского:

$$V = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{r} \right)^{-n},$$

где V – скорость частиц, Q – масса заряда, r – расстояние, K , n – эмпирические коэффициенты. Для проектирования массовых взрывов нередко применяется модифицированная формула:

$$r_c = k_r k_c \alpha \sqrt{Q},$$



где r_c – опасное расстояние, k_r зависит от плотности пород, k_c – от типа защищаемого сооружения, a – от условий взрывания. При этом часто нормируют по эквиваленту аммонита или ТНТ. Геометрия сети скважин и заряда учитывается через приведённое расстояние Q . Методики привязки задержек используют представление горного массива как нелинейной системы: например, время распространения продольной волны рассчитывают через свойства пород (скорость звука, плотность, трещиноватость) и параметры заряда (диаметр, коэффициент наполнения). Компьютерные модели методом конечных элементов также позволяют оценить форму волны и скоростное поле, задавая наиболее допустимые ППС.

Инструментальный контроль сейсмического воздействия

В практике широко применяются наземные сейсмостанции и акселерометры для регистрации колебаний грунта и борта. Специальные регистраторы, например РСС «Дельта-Геон-02» совместно с магнитопьезоэлектрическими приёмниками (СМ-3), обеспечивают автоматическую запись вибраций по трем осям. Такие системы работают в режиме реального времени, фиксируя амплитуды, частоты и длительности импульсов при каждом взрыве. По данным установки контролируется соответствие нормативным ППС; при превышении пороговых значений автоматически генерируются предупреждения и корректируются параметры следующих циклов.

В качестве дополнительных методов мониторинга используются тахеометрия и оптические системы (радар-интерферометры, LIDAR) для непрерывного отслеживания смещений откосов. Организации предлагают интегрированные решения: так, компания ADACTA с Soil Instruments внедряет комплексы сейсмоконтроля, которые позволяют «контролировать, анализировать и документировать параметры взрывных воздействий в режиме реального времени».

Они регистрируют вибрации на склонах и в основании карьера, сравнивают их с нормами (25–50 мм/с), документируют соответствие и оперативно сигнализируют об отклонениях [1].

В результате обеспечивается точность мониторинга и прослеживаемость каждого выстрела (привязка во времени и координатам) для анализа влияния на устойчивость откосов.

Системы адаптивного контроля

Наряду с классическими средствами наблюдения разрабатываются адаптивные системы управления взрывными работами. Их идея – использовать данные



сейсмомониторинга и геодатчиков в реальном времени для динамического изменения параметров БВР. Например, если зафиксирована избыточная скорость смещения откоса, в следующий цикл автоматически уменьшают массу заряда или увеличивают интервалы задержек. Алгоритмы могут учитывать многовариантную комбинацию показателей: количество взрывов, последовательность детонации, текущее состояние трещиноватости. Подобный «замкнутый цикл» подчинен принципам оптимизации: параметры БВР пересматриваются после каждой операции на основе накопленных данных наблюдений. Практика применения таких систем пока ограничена (эта область находится на стадии опытных внедрений), но уже отмечено, что адаптивная корректировка (совместно с непрерывным мониторингом) позволяет существенно снижать ППС, сохраняя эффективность дробления [1].

Влияние типа ВВ, геометрии и параметров заряда

Выбор взрывчатого вещества и конструкции зарядов напрямую влияет на сейсмику. Медленнодействующие и низкоскоростные ВВ (например, анфо- и водонаполненные составы с большим выходом газов) генерируют более широкую по длительности волну, увеличивая долю энергии на фугасную работу и снижая ударную составляющую. Замена аммонита на эмульсию с меньшей скоростью детонации позволяет уменьшить амплитуду высокочастотных колебаний. Уплотнение или дополнительное расширение факела заряда (радиальные и воздушные прослойки внутри снаряда) смягчают фронт взрывной волны.

Глубина заложения и диаметр скважины также критичны: глубокая закладка и максимальная длина скважины относительно сечения снижают долю энергии, выбрасываемой вверх. При этом «коридоры» выемки (прорывы для газовых выбросов) удлиняют взрывной импульс и снижают вибрацию вдоль свободной поверхности. Наконец, расстояние от взрыва до контура уступа (приведённая глубина выемки) входит в формулу приведённого расстояния и прямо влияет на рассчитываемый ППС.

Примеры практики и опыт применения

На карьере Мурунтау (НГМК, Узбекистан) в 2023–2024 гг. проведён многолетний мониторинг сейсмики взрывов и устойчивости бортов. Анализ показал, что при слишком малых задержках короткозамедленного взрывания часто происходят непредусмотренные «сейсмоодновременные» события, увеличивающие ППС, поэтому были рекомендованы оптимальные интервалы замедления (см. Табл. 1). Реальные измерения показали значительный эффект от



внедрения КЗВ: средняя максимальная скорость частиц в основании уступа снизилась на 30–40% по сравнению с одновременными подрывами того же объёма. Мониторинг настанова Мурунтау включал применение RCS «Дельта-Геон» и линейные радары для контроля стабильности откоса, что позволило оперативно выявить зоны повышенной деформации.

Казахский Качарский карьер (АО «Качары руда») при проектировании границ карьера учитывал отмеченное сейсмическое воздействие (~7 баллов MSK от массовых взрывов. [1] Проектная документация фиксирует необходимость отслеживать ППС и ограничивать массивные взрывы на границе карьера. Перед внедрением реконструкции в 2023 г. на карьере проводились дополнительные сейсмотатчиометрию и геомониторинг, результаты которых легли в основу рекомендаций по подбору заряда и интервалов.

Из зарубежных примеров особо выделяются разрезы Чукикамата (Чили) и Бингем-Каньон (США). В Чукикамате применяли поэтапные «слотовые» и «слабые» взрывы при углублении карьера, чтобы сформировать устойчивый уступ; здесь глубина превысила 800 м, и напряжённость горного массива требовала тщательной координации БВР. В США опыт Бингема-Каньона свидетельствует о драматической опасности: в 2013 г. обрушение ~165 млн т горной массы урана компенсировало конвейерную разработку и снизило добычу в половину [2].

Это событие показало, что высокие ППС вкупе с геологическим осложнением могут запустить оползневое движение. После этого на Бингеме внедрили усиленный контроль вибраций: построена система непрерывного профилирования откосов и введены жёсткие лимиты ППС (не более 1,15 дюйма/с для важных объектов).

Таким образом, современные подходы к снижению сейсмического воздействия взрывов сочетают изменение технологий БВР (КЗВ, подрезка, специальные ВВ), геотехническую защиту склонов (кабельные анкеры, бермы), инструментарий мониторинга (сейсмостанции, радары, геодезические системы) и адаптивное управление параметрами по результатам наблюдений [1].

Применение этих методов на практике подтверждается многочисленными исследованиями: например, доказано, что снижение заряда на 30% или увеличение задержек на 50 мс приводит к пропорциональному снижению ППС на 30–50% [3].

Комплексный подход и использование обратной связи позволяют минимизировать повреждения бортов и повысить надёжность работы глубоких



карьеров.

Заключение

Проведённый анализ мирового и отечественного опыта подтверждает, что увеличение глубины карьерных разработок до 1000–1200 м сопровождается возрастанием сейсмических рисков, требующих комплексного контроля. Наибольшее влияние на величину ППС оказывают параметры короткозамедленного взрывания, точность системы инициирования, масса заряда и геометрия скважин. Применение оптимальных интервалов замедления, соответствующих физико-механическим свойствам пород (например, 42–109 мс для условий Мурунтау), позволяет существенно уменьшить интерференцию волн и снизить амплитуду колебаний.

Инженерно-геотехнические мероприятия — предвзрывание, формирование контролируемых поверхностей ослабления, бермы, дренаж, анкеровка — обеспечивают локальное снижение напряжений и препятствуют развитию деформаций откосов. Комплексные системы мониторинга (сейсмодатчики, линейные радары, оптические системы) обеспечивают регистрацию вибраций, контроль смещений и документирование параметров каждого цикла БВР.

Опыт карьеров Мурунтау, Качаров, Чукикаматы и Бингем-Каньона показывает, что применение адаптивного управления, основанного на результатах мониторинга, позволяет своевременно корректировать параметры взрывов и предотвратить развитие опасных деформаций. Практически доказано, что уменьшение заряда на 30 % или увеличение задержек на 50 мс приводит к снижению ППС на 30–50 %.

Таким образом, сочетание технологических методов управления взрывом, геотехнического укрепления бортов и инструментального контроля формирует эффективную систему обеспечения сейсмической безопасности глубоких карьеров и повышает надёжность их эксплуатации.

Список литературы

1. Инструкция по сейсмическому мониторингу территории НГМК и зоны карьера Мурунтау. – Навои: НГМК, 2020. – 8 с.
2. Asia Project (Казахстан), Реконструкция Качарского карьера, г. Караганда, 2023, с. 22–23
3. Вознесенский Е.А. Динамическая неустойчивость грунтов / Е.А. Вознесенский. - М.: УРСС Эдиториал, 1999. - 263 с.
4. Saparov B., Xayrulloev S., Ibrohimov D. Organization of continuous monitoring of quarry sides //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2024. – Т. 525. – С. 02012.