Taraqqiyot spektri
ILMIY JURNALI
Vol 2 № 6 2026

УПРАВЛЕНИЕ ИМПУЛЬСОМ ВЗРЫВА СООСНЫМИ КОНИЧЕСКИМИ ПОЛОСТЯМИ СКВАЖИННОГО ЗАРЯДА: АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ И СНИЖЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА

М.Ф.Файзиллаев

АО «НГМК», Центральное проектное бюро (Республика Узбекистан)

М.А.Идрисов

АО «НГМК», Центральное проектное бюро (Республика Узбекистан)

Ш.Ш.Хайруллоев

Алмалыкский филиал НИТУ «МИСИС», 110100, г. Алмалык, Республика Узбекистан

(khairulloev.ss@misis.uz)

Аннотация: В статье предложена и теоретически обоснована концепция управления импульсом скважинного заряда путём формирования в стенке скважины каскада соосных конических полостей. Показано, что на наклонных границах «порода — воздух» ($Z_2 \ll Z_1$) реализуется отражение волны сжатия с инверсией фазы ($R \approx -1$), порождающее управляемые волны растяжения непосредственно у скважины. Построена аналитическая каскадная модель, описывающая преобразование одиночного высокоамплитудного импульса в серию ослабленных волн растяжения: амплитуды и энергии последовательных импульсов образуют геометрическую прогрессию $P_i = P_0 \cdot \alpha^i$, $E_i = E_0 \cdot \alpha^{2i}$. Коэффициент сохранения амплитуды разделён на поглощательную (связанную с добротностью породы Q) и

Taraqqiyot spektri

геометрическую составляющие, что исключает произвол при калибровке. Энергетический баланс $\Sigma\alpha^{2i} < 1$ подтверждает, что способ перераспределяет энергию взрыва во времени, не увеличивая её. Расчётные оценки показывают снижение пикового давления приблизительно на 30 % при увеличении эффективной длительности нагрузки примерно втрое, что по законам подобия соответствует снижению пиковой скорости колебаний (PPV) на 15–25 % и повышению устойчивости бортов карьера. Определено влияние обводнения (|R| снижается с ≈1 до ≈0,79) и обоснованы рекомендуемые диапазоны геометрических параметров каскада.

Ключевые слова: буровзрывные работы, импульс взрыва, волны напряжений, акустический импеданс, отражение волн, инверсия фазы, коническая полость, добротность породы, сейсмическое действие взрыва, PPV, устойчивость бортов карьера.

1. Введение

Буровзрывные работы (БВР) остаются основным способом подготовки крепких горных пород к выемке на карьерах и определяют как качество дробления, так и уровень сейсмического воздействия на борта и охраняемые объекты. При традиционной технологии значительная доля энергии взрыва расходуется непродуктивно: в ближней зоне переизмельчения у стенки скважины, где напряжения многократно превышают прочность породы, и в дальней зоне упругих колебаний, где энергия уходит в сейсмические волны, угрожающие устойчивости уступов. Повышение эффективности БВР сводится, таким образом, к перераспределению энергии в пользу зоны трещинообразования при одновременном снижении пиковой амплитуды нагрузки [1, 2].

Известно, что разрушение горных пород наиболее эффективно по механизму растяжения, поскольку предел прочности пород на растяжение примерно на порядок

Taraqqiyot spektri

ниже предела прочности на сжатие [2, 6]. Традиционно растягивающие напряжения формируются при отражении волны сжатия от свободной поверхности уступа (эффект Гопкинсона, откол). Настоящая работа развивает эту идею: предлагается создавать управляемые волны растяжения не только на внешней поверхности уступа, но и непосредственно у скважины — на наклонных конических границах «порода — воздух», искусственно сформированных в её стенке.

Целью исследования является разработка аналитической модели перераспределения импульса взрыва каскадом соосных конических полостей скважинного заряда, позволяющей количественно оценить снижение пикового давления, изменение длительности нагрузки и связанное с ними снижение сейсмического действия взрыва. Модель должна опираться на справочные физико-механические свойства массива и содержать минимум калибруемых параметров.

2. Теоретические предпосылки

Действие взрыва на массив в волновой стадии описывается аппаратом механики деформируемого твёрдого тела. Разложение уравнения движения упругой среды (Ламе — Навье) на безвихревую и соленоидальную составляющие выделяет две независимые волновые моды — продольную (P-волну) и поперечную (S-волну) — со скоростями [4, 7]:

$$c_p = \sqrt{\left[\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}\right]} \qquad c_s = \sqrt{\left(\frac{\mu}{\rho}\right)}$$

Здесь λ, μ — постоянные Ламе, ρ — плотность. Наиболее быстрая P-волна первой выходит на границы полостей и переносит основную часть энергии волновой стадии, поэтому именно она является предметом анализа. Поведение волны на границе двух сред определяется их акустическими импедансами $Z = \rho \cdot c$. При нормальном падении плоской продольной волны из породы (Z_1) на содержимое

Taraqqiyot spektri

полости (Z_2) коэффициенты отражения R и прохождения T по амплитуде напряжения равны [3, 4]:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{(Z_2 + Z_1)} \qquad T = \frac{2Z_2}{(Z_2 + Z_1)}$$

Доля энергии, отражённой в породу, равна R^2. Предельный случай податливой границы — свободная поверхность (граница с газом), для которой $Z_2 \ll Z_1$ и $R \to -1$: падающая волна сжатия отражается почти полностью, меняя знак, и возвращается в массив как волна растяжения [3]. Когда растягивающее напряжение превышает динамический предел прочности породы на растяжение, происходит отрыв (откол) — наиболее «экономичный» механизм разрушения [3, 5, 6]. Именно этот эффект и предлагается воспроизводить на конических границах «порода — воздух» внутри скважины.

Амплитуда волны убывает вследствие геометрического расхождения фронта (для сферической волны — как 1/r) и поглощения в породе; существенно, что поглощение растёт с частотой: амплитуда гармоники частоты f на пути s ослабляется множителем $\exp(-\pi \cdot f \cdot s/(Q \cdot c_p))$, где Q — добротность породы [2]. Это частотно-избирательное затухание положено в основу каскадной модели (раздел 3). Часть энергии взрыва уходит в сейсмические волны, интенсивность которых характеризуют пиковой скоростью колебаний грунта (PPV), описываемой законом подобия по приведённому расстоянию [12, 13]:

$$PPV = K \cdot (SD)^{-\beta}, \qquad SD = \frac{R}{\sqrt{Q}}$$

где SD — приведённое расстояние, R — расстояние до точки наблюдения, Q — масса заряда в ступени замедления, K и β — эмпирические коэффициенты массива. Поскольку PPV растёт с пиковой амплитудой нагрузки, снижение пика импульса напрямую снижает сейсмическое действие взрыва [7, 14].

3. Аналитическая модель перераспределения импульса

Taraqqiyot spektri

3.1. Физическая постановка и допущения

Рассматривается скважина диаметром d, в стенке которой выполнен каскад из n соосных конических полостей с наибольшим диаметром D > d, наклонными к оси гранями (угол γ) и осевым шагом s. Полости заполнены воздухом (при обводнении — водой). Приняты допущения: волна, распространяющаяся от заряда, в окрестности полости рассматривается как локально плоская; отражение на границе «порода — флюид» описывается акустическим приближением; нелинейные эффекты ближней зоны учитываются косвенно — через параметры исходного импульса P_0, E_0, выходящего из зоны интенсивного дробления в упругую область, где и работает каскад полостей. Эти допущения позволяют получить замкнутые соотношения, калибруемые далее численно и экспериментально.

3.2. Отражение на границе «порода — флюид» и влияние обводнения

Для границы «порода — воздух» $Z_2 \ll Z_1$ и $R \approx -1$: волна сжатия практически полностью отражается как волна растяжения. При обводнении полости водой импеданс Z_2 возрастает, $|R|$ снижается приблизительно до 0,79, и до ≈38 % энергии волны уходит в воду. Тем самым обводнение определяет нижнюю границу применимости способа — обстоятельство, существенное для карьеров региона и требующее конструктивных мер по герметизации полости.

3.3. Каскадная модель затухания серии отражений

При прохождении волны вдоль каскада каждая полость формирует отражённый импульс, ослабленный по сравнению с предыдущим. Введём коэффициент сохранения амплитуды α (0 < α < 1) на одну секцию. Тогда амплитуды и энергии последовательных импульсов описываются геометрической прогрессией:

$$P_i = P_0 \cdot \alpha_i, \qquad E_i = E_0 \cdot \alpha 2i, \qquad i = 1, 2, \dots, n$$

Наибольшим является первый отражённый импульс (амплитуда $\alpha \cdot P_0$), поэтому пиковое давление снижается на $(1 - \alpha) \cdot 100\,\%$, а эффективная длительность

Taraqqiyot spektri

нагрузки возрастает приблизительно в n раз. Так одиночный высокоамплитудный пик заменяется серией ослабленных волн растяжения, более «мягко» и продолжительно нагружающих массив.

3.4. Связь коэффициента затухания с добротностью породы

Коэффициент α разделяется на внутреннюю (поглощение в породе) и геометрическую составляющие: $\alpha = \alpha_{int} \cdot \alpha_{geom}$. Внутренняя составляющая связана с добротностью Q:

$$\alpha_{int} = \exp(-\pi \cdot f \cdot s / (Q \cdot cp))$$

где f — преобладающая частота, s — осевой шаг каскада, c_p — скорость продольной волны. Такое разделение принципиально: α_{int} вычисляется по справочным свойствам породы, и калибровке (численной либо экспериментальной) подлежит только геометрическая составляющая α_{geom}, что исключает произвол в подборе параметров модели.

3.5. Энергетический баланс каскада

Суммарная энергия серии отражённых импульсов составляет $E_0 \cdot \Sigma\alpha^{2i}$ (i = 1…n). Поскольку α < 1, эта сумма всегда меньше единицы:

$$\Sigma\, \alpha^{2i} < 1$$

то есть способ не увеличивает энергию взрыва, а перераспределяет её во времени, снижая пиковую мощность нагрузки. Это принципиальное положение исключает спекуляции об «усилении» взрыва и согласуется с законом сохранения энергии [1, 21].

3.6. Расчётный пример

Для крепкой породы ($c_p \approx 4000$ м/с, Q ≈ 50, f ≈ 20 кГц, s ≈ 1 м) по приведённым соотношениям $\alpha_{int} \approx 0{,}73$; при $\alpha_{geom} \approx 0{,}95$ получаем $\alpha \approx 0{,}70$. Для каскада из трёх конусов амплитуды импульсов составляют 0,70; 0,49 и 0,34 от P_0 — пиковое давление

Taraqqiyot spektri

снижается приблизительно на 30 % при увеличении эффективной длительности нагрузки примерно втрое. По закону подобия для PPV это соответствует расчётной оценке снижения пиковой скорости колебаний на 15–25 %. Приведённые значения являются расчётными оценками по модели и подлежат экспериментальному подтверждению.

4. Результаты и обсуждение

Построенная модель даёт замкнутое описание перехода от одиночного импульса к серии ослабленных волн растяжения и связывает наблюдаемый эффект с измеримыми свойствами массива. Снижение пикового давления уменьшает размер непродуктивной зоны переизмельчения у стенки скважины, а удлинение нагрузки и формирование дополнительных волн растяжения внутри массива способствуют развитию системы трещин, то есть перераспределению энергии в пользу зоны трещинообразования [2, 7]. Одновременно снижение пиковой амплитуды нагрузки уменьшает сейсмическое действие взрыва: по закону подобия для PPV расчётное снижение пика на ≈30 % соответствует уменьшению пиковой скорости колебаний на 15–25 %, что повышает устойчивость бортов карьера и расширяет допустимую массу заряда в ступени замедления вблизи охраняемых уступов [12, 13, 14].

Эффективность способа определяется набором геометрических параметров каскада: числом конусов n (число отражений и эффективная длительность), углом γ (направленность отражённой волны вдоль оси скважины), отношением D/d (радиальная глубина полости и «удержание» воздушной ударной волны) и шагом s (интерференция отражённых волн и затухание α_{int}). Совместный анализ аналитической модели и физических ограничений позволяет рекомендовать диапазоны n = 1…4, γ = 10…30°, D/d = 1,3…2,0, подлежащие уточнению численным моделированием и натурным экспериментом.

Taraqqiyot spektri

Принципиальным ограничением способа является обводнённость массива: заполнение полости водой повышает импеданс границы, снижает |R| и долю энергии, возвращаемой в породу в виде волн растяжения. Для условий обводнённых карьеров региона это требует конструктивных решений по герметизации полостей. В отличие от традиционного рассредоточения заряда воздушными промежутками, предлагаемый способ управляет формой импульса через геометрию самой скважины, что открывает возможность направленного, а не только амплитудного воздействия на массив.

5. Выводы

1. Предложена концепция управления импульсом скважинного заряда каскадом соосных конических полостей: на наклонных границах «порода — воздух» ($Z_2 \ll Z_1$) реализуется отражение волны сжатия с инверсией фазы ($R \approx -1$), формирующее управляемые волны растяжения непосредственно у скважины.

2. Построена аналитическая каскадная модель $P_i = P_0 \cdot \alpha^i$, $E_i = E_0 \cdot \alpha^{2i}$ с разделением $\alpha = \alpha_{int} \cdot \alpha_{geom}$ и связью α_{int} с добротностью породы Q, что сводит число калибруемых параметров к одному.

3. Энергетический баланс $\Sigma\alpha^{2i} < 1$ подтверждает, что способ перераспределяет энергию взрыва во времени, не увеличивая её.

4. Расчётные оценки показывают снижение пикового давления приблизительно на 30 % при увеличении эффективной длительности нагрузки примерно втрое, чему соответствует снижение PPV на 15–25 % и повышение устойчивости бортов карьера.

5. Определено влияние обводнения (|R| снижается с ≈1 до ≈0,79) и обоснованы рекомендуемые диапазоны геометрических параметров каскада ($n = 1…4$, $\gamma = 10…30°$, $D/d = 1{,}3…2{,}0$), подлежащие уточнению численным моделированием и натурным экспериментом.

Taraqqiyot spektri

Список литературы:

1. Persson P.-A., Holmberg R., Lee J. Rock Blasting and Explosives Engineering. — Boca Raton: CRC Press, 1994. — 560 p.
2. Zhang Z.-X. Rock Fracture and Blasting: Theory and Applications. — Oxford: Butterworth-Heinemann (Elsevier), 2016. — 528 p.
3. Rinehart J.S. Stress Transients in Solids. — Santa Fe: HyperDynamics, 1975. — 230 p.
4. Kolsky H. Stress Waves in Solids. — Oxford: Clarendon Press, 1953 (Dover reprint, 1963). — 224 p.
5. Hopkinson B. A method of measuring the pressure produced in the detonation of high explosives or by the impact of bullets // Phil. Trans. R. Soc. Lond. A. — 1914. — Vol. 213. — P. 437–456.
6. Ханукаев А.Н. Энергия волн напряжений при разрушении горных пород взрывом. — М.: Госгортехиздат, 1962. — 199 с.

Taraqqiyot spektri