

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.235

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА АДАПТАЦИИ ПАРАМЕТРОВ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ К УСЛОВИЯМ СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В. Л. Яковлев, С. Н. Жариков, А. С. Реготунов, В. А. Кутуев

*Институт горного дела УрО РАН, E-mail: 9634447996@mail.ru,
ул. Мамина-Сибиряка, 58, 620075, г. Екатеринбург, Россия*

Представлено обоснование метода динамической адаптации параметров буровзрывных работ (БВР) к условиям сложноструктурных месторождений, разрабатываемых открытым способом на основе объединенной зонной теории и теории импульса взрыва. Рассмотрены ключевые этапы развития подходов к расчету параметров БВР. Особое внимание уделено зонной теории разрушения горных пород, описывающей формирование зон деформации, трещинообразования и сейсмического воздействия в зависимости от импульса взрыва. Предложены расчетные формулы для определения импульса, радиусов зон разрушения и баланса энергии, направленные на рациональное дробление горных пород и минимизацию негативных эффектов. Подчеркивается необходимость внедрения интеллектуальных систем на базе искусственного интеллекта (ИИ), способных анализировать геологические данные в реальном времени. Разработаны принципы для создания интеллектуальных систем управления БВР, способных адаптироваться к изменяющимся горно-геологическим условиям. Это позволит повысить экономическую эффективность и промышленную безопасность БВР на горнодобывающих предприятиях России в условиях разработки сложноструктурных месторождений.

Буровзрывные работы, адаптация параметров БВР, сложноструктурные месторождения, энергетический баланс взрыва, импульс взрыва, зоны действия взрыва, технические приемы, сейсмическое воздействие

DOI: 10.15372/FTPRI20250307

EDN: NXQORP

Современная горнодобывающая промышленность сталкивается с проблемой разработки месторождений, характеризующихся структурной неоднородностью, трещиноватостью и изменчивостью физико-механических свойств пород. Несмотря на существующий ассортимент взрывчатых веществ и средств бурения, ключевой проблемой остается недостаточная адаптивность методов расчета параметров БВР. Стандартные подходы, применяемые на крупных карь-

Исследования выполнены в рамках Государственного задания №075-00410-25-00, темы 1 (2025-2027): Методология обоснования перспектив технологического развития комплексного освоения минерально-сырьевых ресурсов твердых полезных ископаемых России (FUWE-2025-0001), рег. № 1022040200004-9-1.5.1.

ерах Урала и Сибири, зачастую приводят к неоднородному дроблению породы, повышенным энергозатратам и усилению сейсмического воздействия, что увеличивает себестоимость добычи и экологические риски.

Цель настоящей работы — разработка метода расчета параметров БВР, учитывающего динамику изменения данных о горно-геологических условиях, повышающего безопасность производства и минимизирующего энергетические потери [1]. Рассмотрены исторические этапы эволюции методов.

РАЗВИТИЕ ПОДХОДОВ К РАСЧЕТУ ПАРАМЕТРОВ БВР

Ранний этап (середина XVII – начало XX в.). На ранних этапах развития горного дела расчеты параметров БВР основывались на упрощенных формулах, которые учитывали лишь базовые геометрические параметры: высоту уступа, диаметр скважины и объем породы. Методы опирались на практический опыт, а не на научный анализ свойств массива горных пород или характеристик ВВ. За рубежом удельный расход ВВ определялся по формулам французских военных инженеров де Виля и де Вобана, а в России по выражениям военных инженеров М. М. Фролова и М. М. Борескова [2], связывающих объем разрушаемой породы с эмпирическим коэффициентом, полученным экспериментальным путем. В методах не учитывались физико-механические свойства пород (прочность, трещиноватость), изменчивость параметров ВВ (скорость детонации, энергия) и отсутствовали способы для прогнозирования негативных последствий взрыва (колебания, разлет кусков).

Этап научной систематизации (1930–1990 гг.). С развитием горной науки происходит переход к теоретическим моделям, основанным на физико-математических расчетах [3–7]. В этот период разработаны формулы, учитывающие прочность пород на сжатие, плотность ВВ и скорость детонации. В расчеты ввели коэффициенты, отражающие крепость и трещиноватость пород. Основные достижения — установление акустического импеданса как параметра энергетического соответствия ВВ и массива горных пород. Предложены методы оценки параметров негативного влияния взрывов [8–17] и разработаны первые сейсморегистраторы аналогового типа. Отметим, что советская школа акцентировала внимание на учете физико-механических свойств пород и разработке классификаций горных пород (буримость, взрываемость). В основе зарубежных подходов были статистические модели прогноза дробления и первые компьютерные алгоритмы для оптимизации сеток скважин.

Зонная модель разрушения среды при квазистатическом расширении взрывной полости, предложенная В. М. Кузнецовым, В. Н. Родионовым, В. В. Адушкиным и др. [5–7, 18–21], описывающая разрушение при подземных взрывах через гидродинамические и механические зоны, явилась фундаментом для развития современных исследований действия взрыва цилиндрического заряда ВВ при разработке месторождений открытым способом [22]. Современные программные продукты берут эту теорию за основу и дополняют ее, учитывая больше факторов и нелинейные эффекты.

Этап компьютеризации (1990–2010 гг.) — период, когда ручные расчеты уступили место цифровым технологиям: в программах автоматизировался подбор параметров взрыва, учитывались свойства пород и характеристики ВВ. За рубежом активно внедрялось 3D-моделирование, датчики для мониторинга и сложные алгоритмы прогнозирования результатов взрыва. Это позволило значительно сократить расход материалов и улучшить контроль за процессом. В России переход на цифровые методы шел медленнее из-за нехватки финансирования, устаревшей техники и недостатка квалифицированных кадров. Отечественные решения часто уступали зарубежным в точности, а данные обрабатывались на слабых компьютерах. От-

существовали единые цифровые базы данных, в недостаточной мере проводился учет структурно-прочностных свойств и физико-химических характеристик БВ при ограниченном использовании современных технологий мониторинга. На зарубежных карьерах к 2010-му году уже в полной мере применялись передовые системы [23], тогда как в России компьютеризация оставалась фрагментарной и менее эффективной.

Этап применения искусственного интеллекта (2010 г. – н. в.) в проектировании буровзрывных работ ознаменовался переходом от ручных и компьютерных расчетов к алгоритмам, способным самообучаться и предсказывать результаты взрывов. В мировой практике ИИ уже активно используют: он анализирует данные дронов, датчиков и 3D-моделей карьеров, чтобы повысить точность расчетов параметров взрыва, минимизировать расход взрывчатых материалов и снизить риски для экологии. За рубежом такие системы работают в реальном времени, управляя некоторыми видами горной техники. В России ИИ-технологии тоже применяются, но с некоторым ограничением из-за отсутствия единых стандартов цифровых баз данных для обучения моделей, слабой инфраструктуры (требуется мощные серверы и измерительные датчики). Если за границей ИИ уже управляет дистанционно техникой и предсказывает последствия взрывов с точностью до 90 % [24–28], то в России такие решения пока локальны и чаще тестируются, чем массово внедряются.

Эволюция методов расчета параметров БВР прошла путь от эмпирических формул до цифровых и ИИ-технологий. В мировой практике уже используются интеллектуальные системы для более точного прогнозирования процессов дезинтеграции горных пород. Россия, сохраняя научный задел советского периода, отстает во внедрении современных технологий. Важно отметить, что для обучения ИИ на горнодобывающих предприятиях России отсутствует единая система получения, обработки и анализа больших данных, интегрирующая геологические характеристики пород, телеметрию бурового оборудования и смесительно-зарядных машин, параметры взрывов и их результаты [29–31]. Это препятствует выявлению новых закономерностей дезинтеграции пород, оценке динамики разрушения массива и оптимизации технологических процессов в ходе разработки месторождений.

Современный этап развития организации управления БВР требует не только внедрения автоматизированных решений, но и разработки адаптивного метода, способного динамически получать данные и корректировать параметры взрывных работ в зависимости от изменяющихся свойств массива горных пород.

В качестве теоретической основы для такого адаптивного метода целесообразно использовать модели, объясняющие неоднородность разрушения породы и распределение энергии взрыва. Предлагаемый метод основывается на объединенной зонной теории [5–7, 19–22] и теории импульса действия взрыва [5, 7, 32–38] и позволяет учесть эти аспекты.

ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСА ВЗРЫВА

НА ФОРМИРОВАНИЕ ЗОН РАЗРУШЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИЙ СРЕДЫ

Импульс взрыва (I) скважинного заряда БВ — начальный параметр, во многом определяющий механизмы разрушения массива горных пород. Он характеризует количество энергии, передаваемой породе в единицу времени, и непосредственно влияет на формирование зон влияния взрыва, описанных в объединенной зонной теории. Согласно ей, массив разрушается неравномерно из-за радиального затухания волн напряжений: по мере удаления от эпицентра энергия волн снижается, что формирует границы между зонами с разной степенью деформации и дробления. Распределение энергии между зонами зависит от динамических параметров,

включая сам импульс взрыва и скорость продольной волны, а также от прочностных свойств породы. Вблизи заряда доминируют продольные волны с максимальными амплитудами, тогда как на больших расстояниях преобладают поверхностные волны. Показатель затухания энергии варьируется для ближней, средней и дальней зон, что отражается в их размерах и структурных особенностях. Несмотря на различие терминов, предложенных разными авторами, общая схема распределения остается единой, подчеркивая взаимосвязь импульса, энергии и геомеханических характеристик среды (таблица).

Классификация зон действия взрыва

Зона действия взрыва	Название зоны, предложенное разными авторами	Авторы	Преобладающие волны	Границы условного радиуса, R	Диссипация импульса взрыва
I	Зона раздавливания (текучего состояния)	Покровский Г. И., Федоров И. С. [7]	Напряжения в волне сжатия значительно превышают предел прочности на сжатие. Порода раздавливается, разрушение носит характер переизмельчения	$3r_0 \leq R \leq 5r_0$	В этой зоне большая часть импульса взрыва поглощается (до 80–90 %) [38–41, 45]
	Зона гидродинамического течения	Кузнецов В. М. [5]		—	
	Зона раздавливания	Родионов В. Н., Адушкин В. В. и др. [6]		—	
	Зона переизмельчения	Лангефорс У., Кильстрем Б. [42]; Броберг К. Б. Фадеев А. Б. [43]		$1r_0 \leq R \leq 3r_0$	
	Зона сплошного раздавливания	Мосинец В. Н., Абрамов А. В. [44]		$0.5r_0 \leq R \leq 4r_0$	
II	Зона пластического течения и интенсивного сжатия среды	Кузнецов В. А. [22]	Ударные, упруго-пластические объемные волны	$3r_0 \leq R \leq 7r_0$	На полезные формы работы газообразных продуктов и сейсмозрывных волн остается не более 10–20 % от начального импульса взрыва [38–41]
	Зона измельчения	Кузнецов В. А. [22]		$2r_0 \leq R \leq 4r_0$	
	Зона растрескивания среды	Покровский Г. И., Федоров И. С. [7]		$8r_0 \leq R \leq 15r_0$	
	Зона дробления	Кутозов Б. Н. и др. [21]; Кузнецов В. М. [5]; Кузнецов В. А. [22]; Тюпин В. Н. [46]		$8r_0 \leq R \leq 30r_0$	
	Зона мелкого дробления	Ракишев Б. Р. [47]		$7.4r_0 \leq R \leq 28.7r_0$	
III	Зона интенсивного развития радиальных трещин (зона дробления)	Фадеев А. Б. [43]	Упругопластические объемные волны сжатия, растяжения, сдвига	$15r_0 \leq R \leq 40r_0$	
	Зона разрушения	Кутозов Б. Н. и др. [21]		$30r_0 \leq R \leq 65r_0$	
	Зона крупного разрушения	Лангефорс У., Кильстрем Б. [42]; Броберг К. Б.		$25r_0 \leq R \leq 50r_0$	
	Зона радиальных трещин	Родионов В. Н., Адушкин В. В. и др. [6]; Кузнецов В. М. [5]; Ракишев Б. Р. [47]		$20r_0 \leq R \leq 59.7r_0$	

Окончание таблицы

	Зона трещин и сдвиговых деформации	Кутузов Б. Н. и др. [21]		$65r_0 \leq R \leq 100r_0$	
	Зона трещинообразования	Кузнецов В. А. [22]		$30r_0 \leq R \leq 60r_0$	
	Зона упругопластических деформаций (зона заколов)	Тюпин В. Н. [46]		$30r_0 \leq R \leq 100r_0$	
IV	Сейсмика ближней зоны	Кутузов Б. Н. и др. [21]	Горизонтальные составляющие продольных волн	$120r_0 \leq R \leq 200r_0$	
	Ближняя зона	Миронов П. С. [48]		$40r_0 \leq R \leq 400r_0$	
V	Зона расширенной сейсмики	Кутузов Б. Н. и др. [21]	Постепенный переход от объемных продольных волн к поверхностным	$200r_0 \leq R \leq 300r_0$	
	Зона пластических деформаций	Лангефорс У., Кильстрем Б. [42]; Броберг К.Б.		—	
	Зона необратимых межблочных подвижек	Кузнецов В. А. [22]		$120r_0 \leq R \leq 260r_0$	
	Зона остаточных деформаций	Тюпин В. Н. [46]		$100r_0 \leq R \leq 300r_0$	
VI	Сейсмика дальней зоны (упругих деформаций)	Кутузов Б. Н. и др. [21]	Упругие поверхностные волны	$R > 300r_0$	
	Зона упругих деформаций	Родионов В. Н., Адушкин В. В. и др. [6]; Кузнецов В. М. [5]; Кузнецов В. А. [22]; Ракишев Б. Р. [47]		$R > 260r_0$	
	Промежуточная зона	Миронов П. С. [48]		$R > 400r_0$	
VII	Зона слабых сейсмических волн	Кутузов Б. Н. и др. [21]	Поверхностные и приповерхностные волны	$R > 1000r_0$	
	Дальняя зона	Миронов П. С. [48]		$R > 4000r_0$	

Примечание: r_0 — радиус заряда, м.

При взрыве преобладают два основных процесса: распространение ударной волны сжатия и локальное воздействие продуктов взрыва вблизи заряда. В непосредственной близости от заряда порода ведет себя как жидкость под высоким давлением (зона гидродинамического течения по В. М. Кузнецову, по В. Н. Родионову — зона полного разрушения, зона необратимого разрушения по Г. И. Покровскому). В таблице — это зона I, где порода дробится на излишне мелкие части, происходят значительные потери начального импульса взрыва до 90 % из-за диссипации энергии на гидродинамическое сжатие, пластические деформации и сублимационные процессы [38–41]. За ее пределами (зона II) ударная волна вызывает радиальные трещины из-за растягивающих напряжений, превышающих предел прочности породы. Совокупность зон I и II образует зону регулируемого дробления, где распространяется достаточно мощная волна сжатия.

После снижения давления газов в центре взрыва сильно сжатая порода разгружается и смещается к центру заряда, за счет чего условный радиус действия уменьшается, а участки породы, прилегающие к полости, испытывают напряжения растяжения и образуются концентрические трещины. В результате этого в породе формируется ряд кольцевых трещин.

Импульс взрыва определяет их интенсивность: чем он выше, тем выраженнее кольцевые трещины. Естественная трещиноватость массива ограничивает развитие трещин в зоне II, уменьшая размеры зон разрушения на 20–25 % по сравнению с монолитом. Однако при групповом взрывании взаимодействие зарядов увеличивает эти зоны на 20–25 %.

За пределами зон дробления (зоны I, II) в поздней фазе взрыва формируются области неупругих деформаций (зоны III–V), где порода подвергается пластическим и сдвиговым деформациям по наиболее развитым дефектам естественной структуры массива, тем самым разрушая его (зона нерегулируемого действия взрыва). Импульс взрыва влияет на их размеры: чем он выше, тем обширнее зона. Далее следуют зоны упругих деформаций (зона VI) и слабых сейсмических волн (зона VII) без нарушений структуры массива. Увеличение импульса расширяет границы этих зон, что может вызывать резонансные частоты (5–20 Гц), опасные для близлежащих сооружений. Контроль импульса в зонах VI и VII критичен для минимизации сейсмического воздействия на охраняемые объекты. Таким образом, импульс взрыва напрямую определяет масштаб переизмельчения, трещинообразования и сейсмические последствия, что требует учета свойств пород, характеристик ВВ и структурно-прочностных характеристик массива горных пород при проектировании взрывных работ.

Из таблицы видно, что исследователи по-разному определяли границы зон, поскольку горно-геологические условия существенно влияют на последствия взрывов. В настоящем исследовании рассматриваются четыре зоны: зона переизмельчения (до долей миллиметра), зона полного дробления, радиального трещинообразования, сдвиговых и упругих (сейсмических) деформаций. Для расчета их границ необходимы данные о волновых характеристиках пород, их плотности, структурно-прочностных свойствах массива и детонационных параметрах, применяемых ВВ.

Управление импульсом на уровне скважинного заряда имеет значительно большее влияние на регулирование зон действия взрыва по сравнению с пространственно-временным управлением взрывами в объеме блока [49], которое в большей мере влияет на границы зон сейсмического воздействия взрыва.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ПРОЕКТНОГО, ДОСТАТОЧНОГО ИМПУЛЬСА ВЗРЫВА И РАДИУСОВ ЗОН ЕГО ДЕЙСТВИЯ

В результате исследования параметров импульса взрыва установлены основные факторы, влияющие на его величину, и предложены расчетные выражения различной сложности [34, 44, 50, 51].

Для нахождения проектного импульса взрыва скважинного заряда наиболее применимо выражение из [44], в котором учтена дополнительная информация из проекта БВР: конструкция заряда, масса и расположение промежуточного детонатора за счет введенных поправок, а также предусмотрен учет прочности стенок скважины, влияния пикового давления и длительности взрыва на величину импульса:

$$I_{\text{проект}} = k_{\text{и}} d_{\text{зар}} l_{\text{зар}}^2 \frac{P_0}{4D} \eta_{\text{к}} \left(1 + C_{\text{д}} \frac{m_{\text{д}}}{Q} \right) k_{00} (1 + \beta t), \quad (1)$$

где $k_{\text{и}}$ — коэффициент, учитывающий расположение промежуточного детонатора (ПД) в скважине: 0.678 (верхнее инициирование) и 0.732 (нижнее инициирование); P_0 — пиковое давление на стенки скважины, Па; D — скорость детонации, м/с; $d_{\text{зар}}$ — диаметр заряда, м; Q — масса заряда, кг; $l_{\text{зар}}$ — длина заряда, м; $\eta_{\text{к}}$ — коэффициент конструкции заряда (для сплошного $\eta_{\text{к}} = 1$; для рассредоточенного $\eta_{\text{к}} = 0.6–0.8$); $C_{\text{д}}$ — коэффициент эффективности промежуточно-

го детонатора (для нижнего расположения ПД $C_d = 0.1 - 0.2$; для верхнего расположения ПД $C_d = 0.05 - 0.10$); m_d — масса промежуточного детонатора, кг; k_{00} — коэффициент прочности стенок взрывной полости; β — экспериментальный коэффициент, определяющий влияние длительности действия взрыва на импульс, $мс^{-1}$; t — время действия взрыва, мс.

При массовом взрыве группы скважинных зарядов величина импульса отдельного заряда определяется совокупностью факторов [37, 47]. В этом случае на импульс каждого заряда дополнительное влияние оказывает направление инициирования относительно свободной поверхности и главных сжимающих напряжений в массиве. Вдоль направления главного сжимающего напряжения импульс взрыва возрастает благодаря снижению сопротивления распространению ударной волны, тогда как при перпендикулярном действии импульса относительно напряжений он снижается из-за отражений и рассеивания энергии. Промежуточный угол 45° дает близкий к базовому результат.

Время замедления между зарядами также существенно изменяет импульс взрыва. Минимальное замедление усиливает эффект наложения встречных ударных волн, а максимальное приводит к потере синхронизации волн и снижению импульса. Комбинированное влияние этих факторов приводит к широкому диапазону изменений: при 0° и минимальном замедлении импульс может достигнуть максимума, а при 90° и больших замедлениях — минимума.

Таким образом, для управления энергией взрыва скважинного заряда необходимо учитывать как пространственную ориентацию зарядов, так и параметры временного замедления. Их влияние позволяет либо усилить импульс для разрушения крепких пород, либо снизить его для минимизации сейсмического воздействия. Дальнейшие исследования могут уточнить зависимость (1) для конкретных типов ВВ и горно-геологических условий.

Для расчета радиусов зон действия взрыва ($R_{др}$ — радиус зоны дробления, м; $R_{тр}$ — трещинообразования, м; $R_{сд}$ — наибольших сдвиговых деформаций, м; $R_{упр}$ — упругих деформаций, м), с учетом структурно-прочностных свойств массива горных пород, проектного импульса взрыва и влияния главных сжимающих напряжений применимы скорректированные выражения, приведенные в [10]:

$$R_{др} = k \sqrt{\frac{V_s}{V_p k_\sigma}} \cdot \sqrt[3]{\frac{I_{\text{проект}}}{\rho V_p}} \leq R_1, \quad (2)$$

$$R_{тр} = k \sqrt{\frac{V_p k_\sigma}{V_s}} \cdot \sqrt[3]{\frac{I_{\text{проект}}}{\rho V_p}} \leq R_2, \quad (3)$$

$$R_{сд} = k \frac{\sqrt{V_s}}{10} \cdot \sqrt[3]{\frac{I_{\text{проект}}}{\rho V_p}} > R_2, \quad (4)$$

$$R_{упр} = k \frac{\sqrt{V_p k_\sigma}}{10} \cdot \sqrt[3]{\frac{I_{\text{проект}}}{\rho V_p}} > R_2, \quad (5)$$

где k — коэффициент учета параметров сложного взаимодействия энергии взрыва, геометрии заряда и структурно-прочностных характеристик массива (определяется экспериментально); V_s — скорость поперечной волны, м/с; V_p — скорость продольной волны, м/с; R_1 — радиус зоны активного разрушения горных пород взрывом, м; $R_1 = 0.58 \sqrt[3]{Q_{\text{дост}} Q_v / (\rho V_p)}$; R_2 — радиус зоны управляемого разрушения горных пород взрывом, м; $R_2 = 1.25 \sqrt[3]{Q_{\text{дост}} Q_v / (\rho V_p)}$; k_σ — коэффициент повышения скорости продольных волн в направлении главных сжимающих

напряжений (предложен авторами статьи); $Q_{\text{дост}}$ — достаточная масса ВВ, кг, $Q_{\text{дост}} = I_{\text{дост}} / (\rho V_p)$ (предложен авторами статьи); Q_v — удельная потенциальная энергия ВВ, Дж/кг; ρV_p — акустический импеданс, кг/м³·м/с.

Из (2)–(5) видно, что импульс влияет на размеры соответствующих радиусов: чем он выше, тем обширнее зоны. Тем не менее, теория и практика [44, 49] показывают, что слишком высокий импульс (связанный, например, с увеличением удельного расхода ВВ) не ведет к улучшению качества дробления, так как рост трещин в этом случае замедляется из-за их ветвления, однако повышается разлет кусков породы и сейсмические колебания. Изменение проектного импульса взрыва $I_{\text{проект}}$ путем использования технических приемов, в случае технологической необходимости, следует проводить до некоторого достаточного его значения $I_{\text{дост}}$. Технический прием — это способ, применяемый для управления параметрами БВР с целью адаптации процесса.

Для каждого конкретного массива горных пород по достаточному импульсу возможно определить предельные границы активного разрушения горных пород взрывом R_1 и управляемого разрушения горных пород R_2 , в которых достигается предельная плотность энергии взрыва, когда трещины в массиве распространяются равномерно и устойчиво, обеспечивая качественное дробление [44].

Достаточный импульс взрыва определяется с учетом скорости звука в породе, скорости роста трещин и их начальной длины, модуля сцепления среды и других факторов [44]:

$$I_{\text{дост}} = \frac{v_{\text{тр}}^{4.5} \sqrt{(V_p^2 - v_{\text{тр}}^2)} \frac{\Theta^4}{\varphi^3} (1 - \mu)}{\sqrt{2l_0} \left[4V_s^3 \sqrt{(V_s^2 - v_{\text{тр}}^2)(V_p^2 - v_{\text{тр}}^2)} - V_p (2V_s^2 - v_{\text{тр}}^2) \right] \mu}, \quad (6)$$

где $v_{\text{тр}}$ — скорость роста трещин, м/с; V_p — скорость продольной волны, м/с; V_s — скорость поперечной волны, м/с; $(\Theta)^4/\varphi^3$ — модуль сцепления среды, МПа/см^{0.5}·10⁻¹; μ — коэффициент Пуассона; l_0 — начальная длина трещины, см.

УПРАВЛЕНИЕ БАЛАНСОМ ЭНЕРГИИ ВЗРЫВА ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ НЕГАТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Если значение проектного импульса взрыва для зон $I_{\bar{r}}$ на расстоянии R от скважинного заряда меньше или больше достаточного $I_{\text{дост}}$, то требуется его корректировка:

$$I_{\bar{r}} = \frac{I_{\text{проект}}}{\bar{r}^{2-\alpha}}, \quad (7)$$

где $\bar{r}$ — приведенный радиус действия заряда, $\bar{r} = R / r_0$; R — расстояние от скважинного заряда, м; α — показатель степени затухания; μ — коэффициент Пуассона.

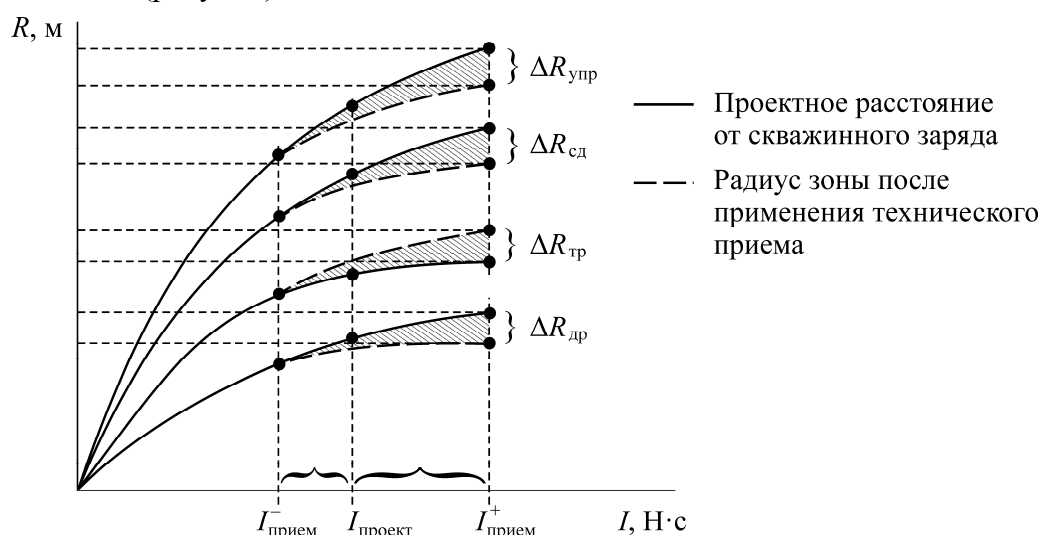
Такая корректировка импульса напрямую связана с необходимостью оптимизации распределения энергии взрыва. Как следует из энергетической теории разрушения горных пород и исследований, проведенных в [3], полная энергия взрыва $E_{\text{ВВ}}$ делится на полезную и бесполезную составляющие. Полезная работа импульса $I_{\text{др}}$ обеспечивает дробление породы и образование трещин, бесполезная — разлет кусков породы $I_{\text{рк}}$, сейсмические колебания $I_{\text{св}}$ и ударную волну $I_{\text{увв}}$. Показано, что фактическая энергия взрыва $E_{\text{ф}} = 0.5E_{\text{ВВ}}$ распределяется как 30–35 % на дробление и 60–65 % на негативные процессы. Таким образом, баланс работы импульса P можно представить в виде уравнения (8):

$$P = \frac{I_{др} + I_{рк} + I_{св} + I_{увв}}{I_{проект}} = \frac{I_{др}}{I_{проект}} + \frac{I_{рк} + I_{св} + I_{увв}}{I_{проект}} = P_{др} + P_{нв} = 1, \quad (8)$$

где $P_{др}$ и $P_{нв}$ — доли полной работы импульса взрывного превращения ВВ в скважине, идущие на дробление и негативное воздействие соответственно.

Из уравнения (8) следует, что всегда существует возможность управления балансом ($P_{др} + P_{нв} = 1$) путем его регулирования, что в будущем позволит создать условия для равномерного дробления при реализации технологии многокомпонентного извлечения полезных ископаемых.

Согласно [4, 10, 18], управление временем и пиковым давлением взрыва для каждого типа породы и условий взрыва позволяет скорректировать проектный $I_{проект}$ и получить достаточный импульс $I_{дост}$, обеспечивающий необходимое дробление и, соответственно, уменьшенное негативное воздействие (рисунок).



Влияние импульса взрыва скважинного заряда на зоны его действия: $I_{прием}^-$ — импульс, сниженный за счет технических приемов до $I_{дост}$; $I_{проект}$ — проектный импульс; $I_{прием}^+$ — импульс, увеличенный за счет технических приемов до $I_{дост}$.

На рисунке представлено влияние указанных параметров проектного импульса на размеры зон разрушения, сдвиговых и упругих деформаций массива горных пород ($R_{др}$, $R_{тр}$, $R_{сд}$, $R_{упр}$). Увеличение времени действия импульса ($+\Delta t$) и уменьшение пикового давления ($-\Delta P_0$) может привести к увеличению разности ($\Delta R_{тр}$) между проектным значением радиуса зоны трещинообразования ($R_{тр. проект}$) и значением радиуса зоны трещинообразования после применения технического приема ($R_{тр. прием}$). В результате происходит перераспределение долей полной работы импульса, описанной в уравнении (8). Разности ($\Delta R_{др}$, $\Delta R_{сд}$, $\Delta R_{упр}$) между проектными радиусами зон полного дробления, сдвиговых и упругих деформаций и полученными значениями после применения технических приемов сокращаются. Напротив, уменьшение времени действия импульса ($-\Delta t$) и увеличение пикового давления ($+\Delta P_0$) может привести к уменьшению ($\Delta R_{тр}$) и увеличению ($\Delta R_{др}$, $\Delta R_{сд}$, $\Delta R_{упр}$). Для конкретных условий взрывания увеличение или уменьшение $R_{тр. прием}$ целесообразно проводить до значения радиуса зоны управляемого разрушения горных пород R_2 .

Проектный импульс, скорректированный до значений $I_{\text{прием}}^+$ или $I_{\text{прием}}^-$, равных достаточному $I_{\text{дост}}$, в каждом конкретном случае может быть рассчитан следующим образом:

$$\begin{cases} I_{\text{прием}}^+ = \prod \xi_i \cdot I_{\text{проект}}, \\ I_{\text{прием}}^- = \prod \psi_i \cdot I_{\text{проект}}, \end{cases} \quad (9)$$

где Π — произведение последовательности коэффициентов действия каждого технического приема; ξ_i и ψ_i — повышающие и понижающие коэффициенты действия технических приемов соответственно.

Корректировка проектного импульса взрыва ($I_{\text{проект}}$) до достаточного его значения ($I_{\text{дост}}$) в соответствии с реальными условиями массива посредством технических приемов позволяет повысить технологическую эффективность взрывных работ, усиливая трещинообразование и снижая деструктивное влияние сопутствующих процессов.

ВЫВОДЫ

Разработан метод динамической адаптации параметров буровзрывных работ в условиях сложноструктурных месторождений на основе интеграции теоретических положений объединенной зонной теории разрушения и теории импульса взрыва. Посредством анализа зон деформации, трещинообразования и сейсмического воздействия показано, что регулирование импульса взрыва позволяет управлять энергетическим балансом, минимизируя переизмельчение породы и негативные эффекты. Предложенные расчетные формулы для определения проектного импульса, радиусов зон разрушения и достаточной энергии взрыва обеспечивают возможность адаптации параметров буровзрывных работ к изменяющимся горно-геологическим условиям. При выборе рациональных технических приемов реализации метода на производстве требуется разработка специального порядка действия для получения и обработки необходимой информации о прочности, трещиноватости пород, акустическом импедансе и напряженно-деформированном состоянии массива. Это может стать основой для повышения экономической эффективности и промышленной безопасности буровзрывных работ на горнодобывающих предприятиях России в условиях разработки сложноструктурных месторождений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яковлев В. Л. Исследование переходных процессов – новое направление в развитии методологии комплексного освоения георесурсов. — Екатеринбург: УрО РАН, 2019. — 284 с.
2. Демидюк Г. П. Взрывные работы. — М.; Л.: ОНТ НКТП СССР, 1937. — 235 с.
3. Андреев К. К., Беляев А. Ф. Теория взрывчатых веществ. — Л.: Оборонгиз, 1960. — 597 с.
4. Мельников В. В., Марченко Л. Н. Энергия взрыва и конструкция заряда. — М.: Недра, 1964. — 139 с.
5. Кузнецов В. М. Математические модели взрывного дела. — Новосибирск: Наука, 1977. — 262 с.
6. Родионов В. Н., Адушкин В. В., Костюченко В. Н., Николаевский В. Н., Ромашов А. Н. Механический эффект подземного взрыва. — М.: Недра, 1971. — 224 с.
7. Покровский Г. И., Федоров И. С. Действие удара и взрыва в деформируемых средах. — М.: Промстройиздат, 1957. — 276 с.
8. Садовский М. А. Сейсмический эффект взрывов. — М.: Гостоптехиздат, 1939. — С. 290–319.
9. Медведев С. В. Сейсмика горных взрывов. — М.: Недра, 1964. — 188 с.

10. Мосинец В. Н. Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах. — М.: Недра, 1976. — 271 с.
11. Оксанич И. Ф., Миронов П. С. Закономерности дробления горных пород взрывом и прогнозирование гранулометрического состава. — М.: Недра, 1982. — 166 с.
12. Кутузов Б. Н., Рубцов В. К. Физика взрывного разрушения горных пород. — М.: МГИ, 1970. — 177 с.
13. Падуков В. А., Антоненко В. А., Подозерский Д. С. Разрушение горных пород при ударе и взрыве. — Л.: Наука, 1971. — 160 с.
14. Сафонов Л. В., Кузнецов Г. В. Сейсмический эффект взрыва скважинных зарядов. — М.: Наука, 1967. — 102 с.
15. Цейтлин Я. И., Смолий Н. И. Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов. — М.: Недра, 1981. — 192 с.
16. Богацкий В. Ф., Фридман А. Г. Охрана инженерных сооружений и окружающей среды от вредного действия промышленных взрывов. — М.: Недра, 1982. — 162 с.
17. Фадеев А. Б., Картузов М. И., Кузнецов Г. В. Методические указания по обеспечению устойчивости откосов и сейсмической безопасности зданий и сооружений при ведении взрывных работ на карьерах. — Л.: ВНИМИ, 1977. — 17 с.
18. Кучерявый Ф. И., Кожушко Ю. М. Разрушение горных пород. — М.: Недра, 1972. — 240 с.
19. Ефремов Э. И., Кравцов В. С., Мячина Н. И., Никифорова В. А., Родак С. И., Шеленок В. В. Основы теории и методы взрывного дробления горных пород. — Киев: Наук. думка, 1979. — 224 с.
20. Друкованный М. Ф., Кравцов В. С., Чернявский Ю. Е. и др. Расчет зон разрушения при взрыве цилиндрических зарядов в скальных породах // ФТПРПИ. — 1976. — № 3. — С. 70–75.
21. Кутузов Б. Н., Ильин А. М., Умнов А. Е., Фридман А. Г., Мосинец В. Н. Безопасность взрывных работ в промышленности. — М.: Недра, 1992. — 544 с.
22. Кузнецов В. А. Обоснование технологии буровзрывных работ в карьерах и открытых горно-строительных выработках на основе деформационного зонирования взрывных уступов: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. — М., 2010. — 43 с.
23. Кирсанов А. К. Анализ программных продуктов для проектирования буровзрывных работ при отработке месторождений подземным способом // Изв. ТулГУ. Науки о Земле. — 2023. — № 2. — С. 249–259.
24. Nguyen H., Drebenstedt C., Bui X.-N., and Bui D. T. Prediction of blast-induced ground vibration in an open-pit mine by a novel hybrid model based on clustering and artificial neural network, Nat. Resour. Res, 2020, Vol. 29. — P. 691–709.
25. Al-Bakri A. Y. and Sazid M. Application of artificial neural network (ANN) for prediction and optimization of blast-induced impacts, Mining, 2021, Vol. 1, No. 3. — P. 315–334.
26. Paneiro G. and Rafael M. Artificial neural network with a cross-validation approach to blast-induced ground vibration propagation modeling, Undergr. Space, 2021, Vol. 6. — P. 281–289.
27. Raj A. K., Choudhary B. S., and Deressa G. W. Prediction of rock fragmentation for surface mine blasting through machine learning techniques, J. Institution Eng. (India): Series D, 2024, Vol. 106, — P. 641–661.
28. Равикумар А., Вардхан Х., Ума Шанкар М. Применение искусственной нейронной сети для прогнозирования индуцированных сейсмических колебаний на угольном разрезе // ФТПРПИ. — 2025. — № 2. — С. 179–193.
29. Рыльникова М. В., Клебанов Д. А., Кабелко С. Г., Стороженко Е. А. Система оптимизации параметров буровзрывных работ и механической подготовки горных работ к выемке на основе непрерывного анализа данных и современных ГГИС // Уголь. — 2025. — № 1. — С. 75–81.

30. Захаров В. Н., Клебанов Д. А., Макеев М. А., Радченко Д. Н. Анализ методов подготовки и преобразования информации, поступающей в хранилища данных для эффективного управления горно-технической системой // Горн. пром-сть. — 2023. — № 5S. — С. 10–17.
31. Захаров В. Н., Каплунов Д. Р., Клебанов Д. А., Радченко Д. Н. Методические подходы к стандартизации сбора, хранения и анализа данных при управлении горнотехническими системами // Горн. журн. — 2022. — № 12. — С. 55–61.
32. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. — М.: Физматлит, 2008. — 652 с.
33. Власов О. Е. Основы динамики взрыва. — М.: Изд-е военно-инженерной академии, 1945. — 350 с.
34. Баум Ф. А., Станюкович К. П., Шехтер Б. И. Физика взрыва. — М.: Физматиздат, 1960. — 800 с.
35. Ханукаев А. Н. Энергия волн напряжения при разрушении пород взрывом. — М.: Госгортехиздат, 1962. — 200 с.
36. Кучерявый Ф. И., Друкованный М. Ф., Гаск Ю. В. Короткозамедленное взрывание на карьерах. — М.: Госгортехиздат, 1962. — 227 с.
37. Сенук В. М. Импульс взрыва и условия более полного использования его на дробление массивов крепких пород при скважинной отбойке // ФТПРПИ. — 1979. — № 1. — С. 28–34.
38. Горинов С. А., Маслов И. Ю. Оценка величины эффективного импульса при взрыве цилиндрического заряда // Проблемы недропользования. — 2022. — № 3 (34). — С. 5–13.
39. Дон Лит Л. Сейсмическое действие взрыва. — М.: Госгортехиздат, 1963. — 87 с.
40. Кук М. А. Наука о промышленных ВВ. — М.: Недра, 1980. — 453 с.
41. Боровиков В. А., Ваягин И. Ф. Моделирование действия взрыва при разрушении горных пород. — М.: Недра, 1990. — 230 с.
42. Лангефорс У., Кильстрем Б. Современная техника взрывной отбойки горных пород. — М.: Недра, 1968. — 284 с.
43. Фадеев А. Б. Дробящее и сейсмическое действие взрывов на карьерах. — М.: Недра, 1972. — 136 с.
44. Мосинец В. Н., Абрамов А. В. Разрушение трещиноватых и нарушенных горных пород. — М.: Недра, 1982. — 248 с.
45. Шевкун Е. Б. Технология и безопасность взрывных работ в карьерах. — Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2019. — 226 с.
46. Тюпин В. Н. Взрывные и геомеханические процессы в трещиноватых напряженных горных массивах. — Белгород: ИД “Белгород” НИУ “БелГУ”, 2017. — 192 с.
47. Ракишев Б. Р. Системы и технологии открытой разработки. — Алматы: НИЦ “Тылым”, 2003. — 328 с.
48. Миронов П. С. Взрывы и сейсмобезопасность сооружений. — М.: Недра, 1973. — 168 с.
49. Тарасенко В. П. Физико-технические основы расчета зарядов на карьерах. — М.: МГИ, 1985. — 84 с.
50. Баум Ф. А., Григорян С. С., Санасарян Н. С. Определение импульса взрыва вдоль образующей скважины и оптимальных параметров скважинного заряда // Взрывное дело. — 1964. — № 54/11. — С. 53–102.
51. Мальцев В. М., Аникин В. В. Импульс скважинного рассредоточенного заряда с забойкой // Горное эхо. — 2024. — № 1 (94). — С. 36–41.

Поступила в редакцию 29/IV 2025

После доработки 15/V 2025

Принята к публикации 16/V 2025