

Методические аспекты и результаты исследований дробящего и сейсмического действия взрыва при открытой разработке месторождений полезных ископаемых

Н.Н. Ефремовцев 

*Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук,
г. Москва, Российская Федерация*
 noee7@mail.ru

Резюме: Рассмотрены методические аспекты проведения исследований дробящего и сейсмического действия взрыва на полигоне и особенности применения метода сглаженных частиц (SPH) для оценки закономерностей изменения параметров в монолитных и трещиноватых массивах. По результатам многолетних полигонных испытаний зарядов различной энергетической насыщенности со скоростью детонации от 1,8 до 8,5 км/с и численного моделирования методом сглаженных частиц проанализирована зависимость результирующей векторной скорости смещения грунта от скорости детонации. Установлено, что зависимость скорости смещения грунта от скорости детонации зарядов и скорости выделения энергии носят полиномиальный характер. Это свидетельствует о сложной, нелинейной природе процесса выделения взрывчатым веществом энергии и ее поглощения неоднородным массивом горных пород по мере удаления от заряда. Такая закономерность подразумевает возможность существования экстремумов – участков максимального или минимального эффекта, что важно учитывать при прогнозировании и оптимизации параметров взрывных работ.

Ключевые слова: буровзрывные работы, сейсмическое воздействие, скорость детонации, кинетика выделения и поглощения энергии, метод сглаженных частиц, монолитный массив, трещиноватый массив, полигонные испытания, результирующая векторная скорость смещения грунта, численное моделирование, оптимизация параметров взрывных работ

Благодарности: Исследования проведены в ИПКОН РАН в рамках научно-исследовательских программ по темам FMMS-2024-0007; FMMS-2024-0008. Использовались результаты проведенных автором исследований по Госконтракту (шифр «Параметр-С») – «Разработка технологии регулирования чувствительности и работоспособности баллиститных порохов, индивидуальных и смесевых ВВ».

Для цитирования: Ефремовцев Н.Н. Методические аспекты и результаты исследований дробящего и сейсмического действия взрыва при открытой разработке месторождений полезных ископаемых. *Горная промышленность*. 2025;(5):38–42. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5-38-42>

Methodological aspects and results of studying the breaking and seismic effects of blasting in surface mining of mineral deposits

N.N. Efremovtsev 

Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
 noee7@mail.ru

Abstract: The paper discusses methodological aspects of studying the breaking and seismic effects of blasting at a test site and the specific features of using the smooth particle hydrodynamics (SPH) method to assess the patterns of parameter changes in solid and fractured rock masses. The dependence of the resulting vector velocity of ground displacement on the detonation velocity was analyzed based on the results of many years of field tests of charges with different energy densities and the detonation velocities ranging from 1.8 to 8.5 km/s, as well as numerical modeling using the smoothed particle hydrodynamics method. It has been established that the dependence of the ground displacement velocity on the detonation velocity of the charges and the energy release velocity is polynomial in nature. This indicates the complex, nonlinear nature of the process of energy release

by the explosive and its absorption by a heterogeneous rock mass as it moves away from the charge. This pattern implies the possibility of extremes, i.e. areas of maximum or minimum effect, which is important to consider when forecasting and optimizing parameters of the blasting operations.

Keywords: drilling and blasting operations, seismic effect, detonation velocity, kinetics of energy release and absorption, smoothed particle hydrodynamics method, solid rock mass, fractured rock mass, field tests, resulting vector velocity of soil displacement, numerical modelling, optimization of blasting parameters

Acknowledgements: The research was conducted at the IPKON RAS as part of FMMS-2024-0007 and FMMS-2024-0008 research programmes. The results of the studies performed by the author under the State Contract entitled 'Development of technology for controlling the sensitivity and performance of ballistit powders, individual and mixed explosives' ('Parameter-C' code name) were used in the research.

For citation: Efremovtsev N.N. Methodological aspects and results of studying the breaking and seismic effects of blasting in surface mining of mineral deposits. *Russian Mining Industry*. 2025;(5):38–42. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5-38-42>

Введение

Рост масштабов открытых горных работ вблизи жилой застройки и объектов производственного назначения, а также необходимость соблюдения требований по сейсмической и экологической безопасности обуславливают актуальность комплексных исследований воздействия взрывов. Влияние технологических факторов и свойств горных пород на сейсмическое действие взрыва рассмотрено в работах [1–4]. Приведены результаты исследований влияния свойств пород и технологических факторов на сейсмическое действие промышленных взрывов, физические процессы формирования и распространения сейсмических волн и особенности их воздействия на механические системы. Проведен анализ влияния на сейсмический эффект массовых взрывов массы взрываемого ВВ, количества групп скважин при различном удельном расходе ПВВ, глубины заложения зарядов, точности средств инициирования. М.И. Садовским, В.Ф. Писаренко [5] рассмотрены особенности режима сейсмического процесса в блоковой геофизической среде земной коры, которая рассматривается как сложная, неоднородная иерархическая система отдельностей. В работах [6; 7] представлены результаты исследований характера влияния скорости детонации на показатели сейсмического действия взрыва и изменение содержания вредных газов при применении различных способов регулирования взрывчатых характеристик ВВ. Рассмотрены результаты систематизации способов управления сейсмическим действием взрыва как основы научного подхода к управлению действием взрыва. Получены методом сглаженных частиц (SPH) зависимости векторной скорости смещения грунта от расстояния до заряда в монолитном и трещиноватом массивах. Приведена методика расчета энергии, расходуемой на сейсмическое действие взрыва и ударную воздушную волну. Однако в настоящее время методы численного моделирования для оценки сейсмического воздействия буровзрывных работ (БВР) остаются недостаточно разработанными.

Актуальность комплексных исследований в области совершенствования способов и средств управления интенсивностью дробления горных пород и сейсмическим действием взрыва обусловлена рядом факторов, к главным из которых следует отнести рост объемов взрывных работ вблизи населенных пунктов и единовременно взрываемой горной массы, различия в требованиях к гранулометрическому составу горной массы при разработке рудных и

нерудных месторождений, несовершенство составов взрывчатых веществ, обуславливающих неполное химическое превращение и неустойчивую детонацию в реальных условиях горного производства.

Методологические аспекты исследований

Объектом исследований являются взаимосвязи между взрывчатыми характеристиками средств разрушения горных пород, интегрального показателя кинетики выделения и передачи энергии массиву и параметрами технологий взрывного дробления, дробящего и сейсмического действия взрыва.

Предмет исследования. Фундаментальные закономерности изменения параметров, характеризующих сейсмическое и дробящее действия взрыва, локализацию напряжений, возникающих под воздействием энергии взрыва в монолитном и трещиноватом массиве горных пород.

Предлагается определять численные значения скорости выделения энергии в удлиненном скважинном или шпуром заряде по следующей формуле:

$$E_3 = M_3 \times Q_{\text{ВВ}} \times C/L$$

где E_3 – скорость выделения энергии, ккал/с; M_3 – масса заряда в 1 м скважины или шпуре, кг; $Q_{\text{ВВ}}$ – теплота взрыва, ккал/кг; C – скорость детонации ВВ, м/с; L – длина заряда, м.

Методика комплексных исследований полезного и вредных действий взрыва разработана на основе классификаций управления дробящим и сейсмическим действием взрывов, комплексных исследований влияния характеристик взрывчатых веществ (ВВ) и конструкций зарядов ВВ на показатели воздействия взрыва на монолитные и трещиноватые массивы горных пород. Для работы в условиях полигона используются созданный в ИПКН РАН испытательный стенд, стандартные имитационные композиционные модели с выделенными цветом зонами действия взрыва (ЗДВ) и образцами горных пород и кристаллосыря. Регистрация сейсмических и акустических волн, скорости и частоты колебаний осуществлялась с использованием специального оборудования. Скорость детонации определялась с применением контактного, электромагнитного и оптико-волоконного методов. По результатам обработки данных фракционного состава получены зависимости изменения индексов трещиноватости пород и кристаллосыря от расстояния до заряда и скорости выделения энергии зарядами ВВ щадящего и дробящего действия. Определен

выход мелких и крупных фракций, изменение трещиноватости образцов в каждой ЗДВ при применении зарядов с различной конструкцией и скоростью выделения энергии, отличающихся диаметром, плотностью ВВ, усложненной морфологией в результате применения комбинированных физико-химических методов, составом компонентов ВВ. Полученная информация используется для калибровки цифровых моделей и оценки эффективности различных способов управления полезным и вредными действиями взрыва. Для изучения возможных изменений упругих свойств пород и плотности дефектов, анизотропии акустических свойств от скорости выделения энергии проводятся исследования с применением оптической микроскопии и ультразвуковое сканирование образцов пород до и после воздействия энергией взрыва или применения комбинированных физико-химических методов разрушения горных пород. При ультразвуковом сканировании определяются времена пробега прямых Р и S волн в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Установлена зависимость вероятностной оценки изменения анизотропии акустических свойств пород от расстояния до заряда и скорости выделения энергии.

Полигонные экспериментальные исследования сейсмического действия взрывов проводят с использованием зарядов идентичной массы и при постоянной влажности грунта. Взрывчатые вещества размещаются в металлических или бетонных оболочках специальной конструкции, что позволяет точно фиксировать скорость детонации и в со-поставимых условиях измерять показатели сейсмического действия зарядов ограниченного диаметра. Для регистрации параметров взрывов применялось современное измерительное оборудование, предназначенное для записи сейсмических колебаний и воздушных ударных волн. Датчики сейсмического воздействия и микрофоны устанавливались на одинаковых от эпицентра каждого взрыва строго фиксированных для каждой серии взрывов расстояниях. В процессе испытаний производилась регистрация амплитудных и частотных характеристик сейсмических волн, а также измерение скорости смещения грунта, по трем ортогональным направлениям. На основе полученных данных рассчитывались средние и максимальные значения скорости смещения, а также результирующая векторная скорость. Дополнительно оценивались параметры взрывного шума, что позволило комплексно охарактеризовать сейсмическое и акустическое воздействие взрывов с различной кинетикой выделения и передачи массиву энергии.

С применением физических экспериментов на полигоне для зарядов со скоростью детонации от 1,8 до 8,5 км/с изучены закономерности влияния скорости детонации на результирующую векторную скорость грунта [6].

Для численного моделирования выбран метод сглаженных частиц SPH, который обеспечивает высокую точность при описании динамики деформируемых тел и процессов разрушения горных пород [8]. В рамках данного подхода были построены цифровые модели как монолитных, так и трещиноватых горных массивов, с учётом реальной геометрии зарядных полостей, свободных поверхностей участков массива, сформированных из ранее разрушенных взрывом горных пород. В моделях воспроизводятся конструкция зарядов, воздушные промежутки, радиальные зазоры, геометрические параметры и пространственное размещение скважин на уступе, время замедления и последовательность инициирования зарядов. С использованием базы данных SPH для проведения расчетов вводятся ха-

теристики различных взрывчатых веществ, отличающиеся скоростью детонации и теплотой взрывчатого превращения.

Особое внимание уделялось моделированию трещиноватых зон с различной ориентацией и толщиной трещин, а также подпорной стенки из ранее взорванных пород. Расчёты проводились в контрольных точках, расположенных на различном удалении от зарядов в различных зонах действия взрыва монолитного и трещиноватого массивов для определения закономерностей пространственного распределения максимальных и средних значений показателей напряжений, возникающих в разрушающем массиве горных пород, и результирующей векторной скорости смещения грунта.

Результаты

В ходе проведённых полигонных и численных исследований установлен полиноминальный характер зависимости численных значений векторной скорости смещения пород (РВС) от расстояния до заряда, индексы снижения РВС в трещиноватом и монолитном массивах [7]. Получены убывающие полиноминальные зависимости РВС от расстояния между скважинным зарядом и бровкой уступа. В рассмотренном случае максимальные и минимальные значения РВС соответствуют расстоянию от крайней скважины соответственно 2 и 4 м. Ярко выраженный нелинейный характер коэффициента эластичности численных значений РВС от расстояния между зарядом и свободной поверхностью бровки уступа обусловлен дифракцией прямых и отражённых волн.

На рис. 1 представлены обобщённые результаты расчётов, полученных для различных зон действия энергии взрыва в массиве. Анализ полученных данных показал, что характер зависимостей РВС от скорости детонации – полиномиальный, что свидетельствует о сложной природе и нелинейной кинетике рассматриваемого процесса передачи и поглощения энергии взрыва массивом горных пород.

На рис. 1 зона 1 показывает полиномиальную зависимость векторной скорости в относительных единицах в ближней зоне действия взрыва в пределах 4–7 радиусов за-

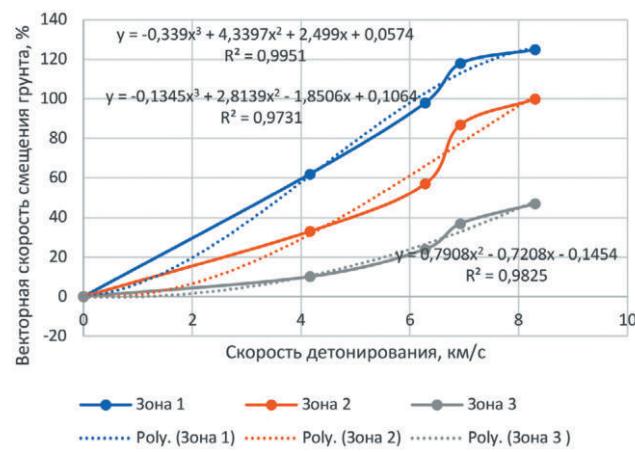


Рис. 1
Зависимости в относительных единицах результирующей векторной скорости смещения грунта от скорости детонации взрывчатых веществ

Fig. 1
Dependencies in the relative units of the resulting vector velocity of ground displacement versus the explosives detonation velocity

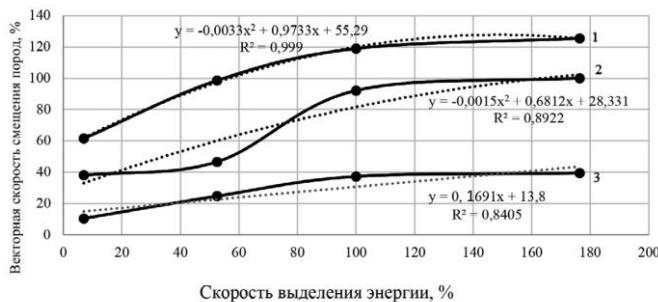


Рис. 2
Зависимости в относительных единицах результирующей векторной скорости смещения грунта от скорости выделения энергии зарядами взрывчатых веществ:
1 – полиномиальная зависимость в относительных единицах векторной скорости в ближней зоне действия взрыва в пределах 4–7 радиусов заряда; 2 – полиномиальная зависимость в пределах 7–12 радиусов заряда; 3 – зависимость результирующей скорости смещения на расстоянии от 50–70 радиусов заряда (в рис сбоку пород)

Fig. 2
Dependencies in the relative units of the resulting vector velocity of ground displacement versus the velocity of energy release by the explosive charges:
1 – the polynomial dependence in the relative units of the vector velocity in the near zone of the blast within (4–7) charge radii;
2 – the polynomial dependence within 7–12 charge radii; 3 – the dependence of the resulting ground displacement velocity at the distance of 50–70 charge radii

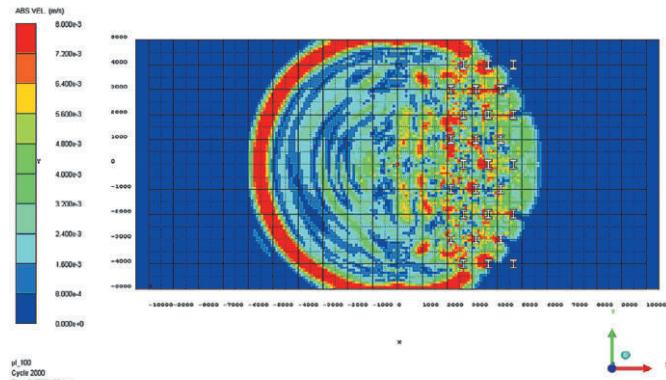


Рис. 3
Структура поля значений результирующей векторной скорости грунта в различные моменты времени при прохождении волной сжатия зоны горных пород, разрыхленной предыдущим взрывом

Fig. 3
The structure of the value field of the resulting vector velocity of the ground at various moments in time as a compression wave is travelling through the zone of rocks loosened by the previous blast

ряда; зона 2 – полиномиальную зависимость в пределах 7–12 радиусов заряда; зона 3 – зависимость на расстоянии от 50–70 радиусов заряда.

На рис. 2 представлены в графическом виде результаты исследований влияния скорости выделения энергии на векторную скорость смещения грунта. Анализ характера изменения графических зависимостей, представленных на рис. 2, позволяет сделать вывод о нелинейном характере зависимости коэффициента эластичности РВС от скорости выделения энергии.

Результаты моделирования подтверждены данными полигонных экспериментов и продемонстрировали хорошее совпадение по основным критериям: значениям амплитуд векторной скорости и характеру ослабления сейсмического сигнала с увеличением расстояния от центра заряда. Выявленные закономерности позволяют сделать вывод о том, что изменение скорости детонации и скорости выделения энергии оказывает качественно сложное воздействие на структуру сейсмического поля. Это обусловлено одновременно действующими технологическими и природными факторами.

Проводятся исследования волн напряжения и скорости смещения грунта при наличии подпорной стенки. На рис. 3 представлены структура поля сейсмичности и численные значения результирующей векторной скорости смещения массива горных пород при взрыве в монолитной его части и нарушенной предыдущим взрывом.

Анализ результатов численных экспериментов показывает значительное изменение локализации областей с максимальными значениями результирующей скорости смещения в нарушенном ранее массиве.

В левой части поля сейсмичности, где горные породы сохраняют монолитную структуру, волны смещения грунта и возникающие напряжения распространяются без разры-

вов по фронту. Они характеризуются максимальными амплитудами и наибольшим периодом колебаний. В правой части поля, находящейся в зоне массива, разрушенного предыдущим взрывом, картина распространения сейсмических волн принципиально иная. Здесь наблюдается рассеивание энергии на структурных неоднородностях, очаговый характер распространения волн напряжений и смещения горных пород. При этом импульсы с высокой результирующей скоростью имеют значительно меньший период колебаний, а средние показатели РВС в разрушенном массиве и за его пределами снижаются в 2 и более раза по сравнению с монолитной частью массива.

Заключение

В результате выполненного исследования установлено, что зависимость результирующей векторной скорости смещения грунта от скорости детонации зарядов и скорости выделения энергии носит полиномиальный характер. Полученные данные подтверждают, что интенсивность сейсмического воздействия определяется не только технологическими факторами, свойствами взрывчатого вещества, конструктивными особенностями заряда и результирующими показателями кинетики выделения и передачи энергии массиву, но и комплексом природных факторов. Характер выявленных зависимостей указывает на наличие экстремумов – диапазонов скорости детонации, при которых сейсмическое воздействие достигает локальных максимумов или минимумов. Степень нелинейности усиливается в трещиноватых массивах, где наблюдаются процессы отражения и дифракции волн. При этом важную роль имеет рассеяние энергии на структурных неоднородностях. Выявленные в результате исследований закономерности открывают возможности для целенаправленного повышения энергетической эффективности и безопасности промышленных взрывов, управления перераспределением энергии вредного воздействия взрыва в полезные формы с целью повышения эффективности дробления горных пород и минимизации негативного влияния на окружающую среду и конструкции охраняемых объектов.

БУРОВЗРЫВНЫЕ РАБОТЫ

Drilling and blasting operations

Проведенные испытания различных взрывчатых веществ показали, что разработанная комплексная методика исследований полезного и вредных действий взрыва на основе классификаций управления кинетикой выделения и передачи энергии разрушаемым средам, обеспечивает получение сопоставимых экспериментальных и расчётных результатов и подтверждает высокую эффективность данного подхода для инженерного прогнозирования и оптимизации параметров буровзрывных работ.

Установленные закономерности могут быть использованы в практической деятельности для проектирования режимов взрывов с учётом допустимых уровней сейсмического воздействия, подбора взрывчатых веществ с оптимальной кинетикой выделения и передачи массиву энергии взрыва, повышения безопасности проведения взрывных работ вблизи жилой застройки, охраняемых объектов и инженерных коммуникаций.

Список литературы / References

1. Мосинец В.Н. *Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах*. М.: Недра; 1976. 271 с.
2. Цейтлин Я.И., Смолий Н.И. *Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов*. М.: Недра; 1981. 192 с.
3. Кузьменко А.А., Воробьев В.Д., Денисюк И.И., Даутас А.А. *Сейсмическое действие взрыва в горных породах*. М.: Недра; 1990. 173 с.
4. Гриб Г.В., Позынич А.Ю., Гриб Н.Н., Петров Е.Е. Зависимость сейсмического действия взрыва в массиве горных пород от технологических условий ведения буровзрывных работ. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2012;14(1-8):2112–2117. Режим доступа: https://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2012/2012_1_2112_2117.pdf (дата обращения: 27.06.2025).
Grib G.B., Pazyynch A.Y., Grib N.N., Petrov E.E. Dependence of the seismic explosive action in the rock massives on the technological conditions of drilling and blasting operations. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2012;14(1-8):2112–2117. (In Russ.) Available at: https://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2012/2012_1_2112_2117.pdf (accessed: 27.06.2025).
5. Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Сейсмический процесс в блочной среде. М.: Наука; 1991. 96 с.
6. Ефремовцев Н.Н., Ефремовцев П.Н. Сейсмические и экологические факторы оптимизации управления кинетикой выделения энергии детонационными системами для обеспечения безопасного ведения взрывных работ. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2012;(S4-14):11–16.
Efremovtsev N.N., Efremovtsev P.N. Seismic and ecological factors of optimization management the kinetics an energy detonation systems to ensure safe conducting explosive works. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2012;(S4-14):11–16. (In Russ.)
7. Федотенко В.С., Ефремовцев Н.Н., Харченко А.В. Методические вопросы комплексной оценки дробящего и техногенного действия взрывных работ при открытой разработке месторождений. *Горная промышленность*. 2024;(6):60–67. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-60-67>
Fedotenko V.S., Efremovtsev N.N., Kharchenko A.V. Methodological issues of a comprehensive assessment of the crushing and man-induced effects of blasting operations in open-pit mining. *Russian Mining Industry*. 2024;(6):60–67. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-60-67>
8. Шиповский И.Е. Расчет хрупкого разрушения горной породы с использованием бессеточного метода. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2015;(1):76–82.
Shipovskii I.Ye. Simulation for fracture by smooth particle hydrodynamics code. *Scientific Bulletin of the National Mining University*. 2015;(1):76–82. (In Russ.)

Информация об авторе

Ефремовцев Никита Николаевич – кандидат технических наук, действительный член Академии горных наук, член Научного совета РАН по проблеме народнохозяйственного использования взрыва, старший научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН; г. Москва, Российская Федерация; e-mail: noee7@mail.ru

Information about the author

Nikita N. Efremovtsev – Cand. Sci. (Eng.), Full-Fledged Member of the Academy of Mining Sciences, Senior Research Associate at Department No. 5 of Geomechanics and Rock Disintegration, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; e-mail: noee7@mail.ru

Article info

Received: 03.07.2025

Revised: 23.09.2025

Accepted: 23.09.2025

Информация о статье

Поступила в редакцию: 03.07.2025

Поступила после рецензирования: 23.09.2025

Принята к публикации: 23.09.2025