Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-186-189

Доступные технологии повышения энергетической эффективности и безопасности разрушения горных пород

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

Резюме: В результате проведенных исследований предложен комплекс методологических и технологических решений, направленный на автоматизацию взрывных работ в особо сложных условиях и повышение мер безопасности производства. Новизна и актуальность предложенных решений подтверждены патентами и результатами испытаний. В статье представлены: 1)_ роботизированная технология формирования скважинных зарядов с переменной энергетической насыщенностью и чувствительностью; 2) методология формирования цифровых двойников имитационных композиционных моделей взрываемых сред, конструкций зарядов испытательного стенда и условий взрывания на полигоне. Разработанная методология позволяет проводить анализ различных способов перераспределения энергии вредного воздействия взрыва на окружающую среду в полезные формы ее использования. Для оценки закономерностей изменения параметров напряженного состояния взрываемой среды, а также процессов предразрушения и фрагментации проведены исследования с применением физических экспериментов и модифицированного (дополненного) метода сглаженных частиц. В результате исследований получены фундаментальные зависимости вектора скорости смещения частиц грунта от взрывчатых характеристик средств разрушения горных пород. Установлено, что зависимость скорости смещения грунта от энергии заряда взрывчатого вещества носит полиномиальный характер. В статье представлены графики изменения внутренней энергии гранул аммиачной селитры с различной морфологией.

Ключевые слова: буровзрывные работы, роботизированные технологии, цифровые имитационные модели, детонация, сейсмическое воздействие взрыва, кинетика выделения энергии, кинетика поглощения энергии, метод сглаженных частиц

Благодарности: Исследования проведены в Институте проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН в рамках научно-исследовательских программ по темам FMMS-2024-0007; FMMS-2024-0008.

Для цитирования: Ефремовцев Н.Н. Доступные технологии повышения энергетической эффективности и безопасности разрушения горных пород. *Горная промышленность*. 2026;(5):186–189. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-186-189

Available technologies for improving energy efficiency and safety in rock blasting

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

Abstract: Based on the research performed, a set of methodological and engineering solutions has been proposed, which aims to introduce automation in blasting operations performed in particularly challenging conditions and to enhance workplace safety. The novelty and relevance of the proposed solutions are confirmed by patents and test results. This article presents: (1) a robotic technology to form borehole charges with variable energy density and sensitivity; (2) a methodology for creating digital twins of simulation composite models of the blasted media, test bench charge configurations, and blasting conditions at the test site. The developed methodology makes it possible to analyze various methods used to redistribute the harmful energy of the blast impact on the environment into useful forms of energy that can be utilized. Studies were conducted using physical tests and a modified (extended) smoothed particle method to assess the patterns of change in the stress state parameters of the blasted media, as well as the processes of pre-failure and fragmentation. The research revealed fundamental relationships between the displacement velocity vector of the rock fragments and the explosive properties of the rock disintegration means. It was established that the relationship between the rock displacement velocity and the explosive energy of the charge is polynomial in nature. This article presents diagrams showing changes in the internal energy of the ammonium nitrate granules with different morphologies.

Keywords: drilling and blasting operations, robotic technologies, digital simulation models, detonation, seismic effects of the blast, kinetics of energy release, kinetics of energy absorption, smoothed particle method

Acknowledgements: The research was performed at the Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences as part of the FMMS-2024-0007 and FMMS-2024-0008 research programmes.

For citation: Efremovtsev N.N. Available technologies for improving energy efficiency and safety in rock blasting. *Russian Mining Industry.* 2026;(5):186–189. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-186-189

Введение

Актуальность комплексных исследований в области совершенствования способов и средств управления интенсивностью дробления горных пород и вредным действием взрыва обусловлена ужесточением требований к охране окружающей среды, ухудшением горнотехнических условий разработки месторождений, повышением объемов взрывных работ на большой глубине, в непосредственной близости с охраняемыми объектами, необходимостью повышения полноты химического превращения и устойчивости детонации для снижения расхода взрывчатых веществ и сейсмического воздействия массовых взрывов. Несмотря на значительное количество работ, посвященных дробящему и сейсмическому действию взрывов [1; 2], влиянию природных и технологических факторов [3; 4], до настоящего времени недостаточное внимание уделялось методологии проведения физических экспериментов в условиях полигона и численным методам исследований закономерностей влияния кинетики выделения энергии на изменения дробящего и вредных действий взрыва с применением цифровых моделей детонационных систем.

В результате проведенных исследований научно обоснован и предложен комплекс методологических и технологических разработок, новизна и актуальность которых подтверждены патентами и результатами испытаний.

Результаты

На основе изучения влияния температуры окружающей среды, вещественного состава и структуры топливной составляющей промышленных взрывчатых веществ на ее реологические свойства и впитывающую способность разработаны рациональные технологические схемы, способы и технологический регламент производства, а также установка для производства поризующих топливных смесей [5] и взрывчатых веществ на их основе [6], адаптированных к условиям применения роботизированных технологий производства ПВВ и заряжания скважин. Использование разработанных составов топливных смесей позволяет многократно увеличить площадь соприкосновения окислителя с топливом и энергетическими добавками [7].

Комплекс инновационных технологических решений [5] направлен на повышение экологической безопасности горного производства за счет вовлечения в производство отходов (отработанного масла и продуктов переработки РТИ – резиновой крошки, сажи, технического углерода, пиролизного масла), расширение функциональных возможностей установки, ассортимента конечной продукции и вариабельности ее свойств, повышение производительности и энергетической эффективности производства.

Группа технических решений может быть использована при организации производства микродисперсных эмульсий или суспензий с целью получения топливных смесей для отопления жилых и производственных зданий, производства промышленных взрывчатых веществ с использованием отходов производства на заводах и непосредственно на местах применения. Установка формируется из оборудования, смонтированного в помещении стационарно или на автотранспортной базе. Она содержит емкости с термостатирующими устройствами для хранения компонентов водной фазы, жидкой углеводородной топливной фазы – отработанного масла, дизельного топлива, эмульгаторов, твердых порошкообразных компонентов и жидких сенсибилизаторов, а также устройства для их дозированной подачи. В состав установки входит аппарат для получения водной фазы эмульсии или суспензии и пропитывающей жидкости, аппарат очистки и подготовки углеводородной фазы для снижения вязкости отработанного масла и/или подготовки углеводородной фазы на основе индустриального масла. Аппарат приготовления эмульсий или суспензий содержит емкость предварительного смешивания водной, жидкой углеводородной топливной фаз, жидких сенсибилизаторов и твердых порошкообразных энергетических добавок, роторно-пульсационную мельницу и ультразвуковой диспергатор, выполненные с возможностью функционирования в замкнутом режиме.

В основе технологического процесса получения эмульсий топливных смесей используются способы производства, предусматривающие несколько стадий диспергирования:

– предварительное смешивание водной фазы, жидкой углеводородной топливной фазы и жидких сенсибилизаторов и твердых порошкообразных энергетических добавок;

– диспергирование смеси жидких и твердых порошкообразных компонентов в роторно-пульсационной мельнице и ультразвуковом проточном диспергаторе в несколько циклов в замкнутом режиме.

После диспергирования поток направляют в статический диспергатор – фильтр, а далее – в емкость для готовой продукции.

Проведен комплекс лабораторных и промышленных испытаний топливных смесей. Разработаны и смонтирована установка по производству поризующих топливных смесей (ТС), технологический регламент на производство топливных смесей с различной энергетической насыщенностью для взрывного дробления пород с высокой и средней крепостью, а также щадящего взрывания в различных климатических условиях, в том числе в условиях Крайнего Севера.

Промышленные испытания установки показали, что ее производительность составляет до 2000 л/смену. Комплекс технологических и конструктивных возможностей позволяет получить стабильные ТС, суспензии с вязкостью, не превышающей вязкость дизельного топлива, и размером глобул водной и топливной фаз эмульсии в среднем 5,47 мк. Максимальные размеры углерода и сажи составляет 9 мк. Обработка ультразвуком позволяет в 10 раз увеличить содержание углерода фракции менее 0,5 мкм, что увеличивает стойкость суспензии до 30 сут.

Разработанные составы взрывчатых смесей и поризующих эмульсий топливных смесей обеспечивают проникновение топлива внутрь гранул непористой селитры и энергетических добавок и позволяют сформировать систему трещин и дефектов в гранулах аммиачной селитры (АС) за счет эффекта Ребиндера, многократно увеличивая площадь контакта между топливом и окислителем. Промышленные испытания Гранулита «ЕФ-П», изготовленного на основе полученных топливных смесей, показали, что заполнение эмульсией гранул плотной аммиачной селитры происходит в течение 2–4 ч и новое взрывчатое вещество имеет взрывчатые характеристики, превышающие штатные, содержащие тротил ПВВ, за счет увеличения площади

соприкосновения топлива, энергетических добавок и окислителя [6].

Технический результат, получаемый при осуществлении изобретения, заключается в повышении промышленной и экологической безопасности горного производства (вовлечения в использование на горном предприятии отходов переработки РТИ и отработанных масел), функциональных возможностей установки, ассортимента конечной продукции и вариабельности ее свойств, производительности и энергетической эффективности производства, в возможности получения энергоемких материалов с различной энергетической насыщенностью и со свойствами, оптимальными для конкретных условий разработки месторождений полезных ископаемых за счет обеспечения оптимальной кинетики выделения энергии.

Предложен комплекс технологических решений, направленный на автоматизацию работ и повышение мер безопасности производства. В патенте описаны роботизированная технология, способы получения взрывчатого состава и формирования детонационной системы с переменной энергетической насыщенностью и чувствительностью. Согласно патенту на группу изобретений [8] производство взрывчатых веществ и заряжание скважин осуществляются с использованием передвижной роботизированной технологической платформы (РТП) на базе смесительно-зарядной машины, которая дополнительно оснащена системами навигации и автономного передвижения в соответствии с заранее заданной траекторией передвижения по блоку и в соответствии с координатами скважин и манипуляционной системой.

Предусмотрено оснащение РТП техническим зрением устройства захвата и подачи зарядных шлангов, регулирующим их положение во времени в трех пространственных координатах, сенсорными системами, обеспечивающими получение и обработку данных о свойствах окружающей среды, контроль положения шлангов по высоте скважины и высоты скважинного заряда с обратной связью, системой оперативного регулирования взрывчатых свойств формируемого заряда. В патенте на группу изобретений [8] предложены шесть способов производства взрывчатых веществ, в том числе четыре способа получения состава шашек детонаторов и промежуточных детонаторов на местах применения, включающих получение невзрывчатой эмульсионной матрицы на основе обратной и/или прямой эмульсии, гранулированной и/или порошкообразной аммиачной селитры и заполнение ими оболочек, отличающихся тем, что до мест применения транспортируются невзрывчатые и некапсюлеактивные смеси в оболочках шашек детонаторов, заполненные невзрывчатой эмульсионной матрицей, а на местах их применения в охлажденную эмульсионную матрицу вводятся и перемешиваются с невзрывчатой эмульсионной матрицей энергетические и сенсибилизирующие добавки.

Научная новизна работы заключается в обосновании методологии комплексных исследований дробящего, сейсмического и других опасных воздействий взрыва на основе классификаций способов управления их параметрами; применении физических экспериментов и модифицированного, дополненного инновационным программным обеспечением метода SPH; использовании цифровых моделей конструкций зарядов и условий взрывных работ на различных масштабных уровнях. Разработана многоцелевая многоканальная система получения и обработки информации с применением волоконно-оптических датчиков для исследования кинетики химических реакций в заряде ВВ, изменения во времени и пространстве ореола распространения пылегазового облака, температуры, концентрации вредных продуктов детонации и пыли. Особое внимание в процессе исследований уделялось стадии предразрушения, кинетике выделения и поглощения энергии взрыва, определяющих количество образующихся мелких фракций, установлению закономерностей изменения во времени и пространстве численных значений параметров напряженного состояния среды, скорости смещения и фрагментации горных пород, изменения анизотропии акустических показателей горных пород в выделенных зонах действия энергии взрыва.

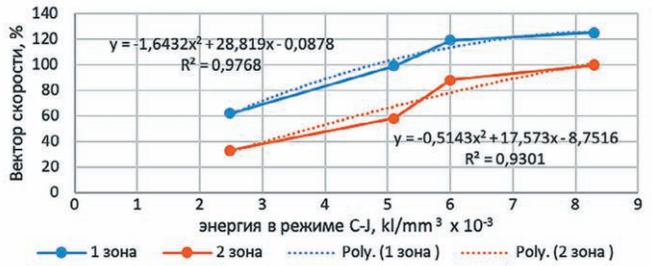


Рис. 1
Зависимости вектора скорости смещения грунта от энергии взрыва заряда различных взрывчатых веществ в режиме C-J – ECJ

Fig. 1
Dependences of the velocity vector of the rock mass displacement on on the explosive energy of various explosives in the C-J – ECJ mode

В качестве примера результатов исследований на рис. 1 представлены обобщённые результаты расчётов, полученных для различных зон действия энергии взрыва.

На рис. 1 показаны полиномиальные зависимости векторной скорости в относительных единицах: зона 1 – в ближней зоне действия взрыва в пределах 4–7 радиусов заряда; зона 2 – полиномиальная зависимость в пределах 7–12 радиусов заряда.

Впервые разработана и апробирована цифровая имитационная модель инициирования, развития и затухания детонации зарядов гранулитов с различной морфологией гранул аммиачной селитры. На рис. 2 приведены некоторые результаты численных экспериментов, полученные с применением дополненной методики применения модифицированного метода сглаженных частиц SPH для анализа результатов воздействия взрыва на различных масштабных уровнях. Дополненный автором модифицированный метод сглаженных частиц предусматривает получение и обработку графических изображений полей деформации, предразрушения и показателей напряженного состояния взрываемых сред, вектора скорости смещения частиц грунта.

Для получения исходных количественных характеристик используется авторский программный модуль, разработанный на JavaScript, выполняющий автоматическую обработку изображений с заданной цветовой шкалой и расчёт долевого распределения показателей. Модуль обеспечивает автоматизированный количественный анализ цветового состава изображений, формирование таблиц распределения пикселей по цветовым классам и расчёт энергетических и других показателей, в дальнейшем используемых в качестве исходных данных для вычислений.

Цифровая имитационная модель позволяет проводить численную оценку изменения во времени и пространстве давления, внутренней энергии в грануле ВВ, в межгра-



Рис. 2
Пример результатов расчета изменения внутренней энергии (J/kg10^7) при детонации гранулы смеси АС/ДТ-6 с базовой и модифицированной морфологией

Fig. 2
An example of the calculation results for changes in the intrinsic energy (J/kg10^7) during detonation of one granule of the AS/DT-6 mixture with the basic and modified morphologies

нульном пространстве, а также за пределами свободной поверхности заряда. Дополненная методика применения модифицированного метода сглаженных частиц SPH предусматривает обработку графических изображений локализации во времени областей пластической деформации, давления, тензора напряжений, внутренней энергии, горячих точек передачи детонации, зон выполнения принятого критерия разрушения среды на стадии предразрушения, изменения скорости фрагментации в зависимости от взрывчатых характеристик ВВ с оценкой кинетики выделения энергии и скорости разлета разрушаемых сред.

Заключение

На основе практического опыта испытаний различных ВВ, проектирования специальных взрывных работ в особо сложных условиях разработаны методология научных исследований и комплекс технологических решений, позволяющих повысить энергетическую эффективность и безопасность взрывных работ с применением инновационных составов взрывчатых веществ, увеличивающих полноту и устойчивость детонации и адаптированных к роботизированной технологии заряжания скважин с переменной энергетической насыщенностью и чувствительностью. Разработана методология анализа различных способов перераспределения энергии вредного воздействия взрыва на окружающую среду в полезные формы ее использования.

Предложена методология формирования цифровых двойников имитационных композиционных моделей взрываемых сред, конструкций зарядов испытательного стенда и условий взрывания на полигоне. Получены фундаментальные зависимости вектора скорости смещения частиц грунта от взрывчатых характеристик средств разрушения горных пород. Ключевым конкурентным преимуществом новых технологий является возможность увеличить безопасность взрывных работ, стабильность и полноту детонации, обеспечить снижение экологических последствий взрывных работ, сформировать зоны дробления в зависимости от прочности пород с использованием зарядов с переменной чувствительностью и кинетикой выделения энергии.

Список литературы / References

1. Мосинец В.Н. *Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах*. М.: Недра; 1976. 271 с.
2. Фадеев А.Б. *Дробящее и сейсмическое действие взрывов на карьерах*. М.: Недра; 1972. 135 с.
3. Кузьменко А.А., Воробьев В.Д., Денисюк И.И., Дауетас А.А. *Сейсмическое действие взрыва в горных породах*. М.: Недра; 1990. 173 с.
4. Тюпин В.Н. *Действие взрыва в трещиноватых массивах горных пород*. Белгород: БелГУ; 2025. 195 с.
5. Ефремовцев Н.Н., Жданов Ю.В., Андержанов С.Р., Левачев С.М., Харлов А.Е., Комиссаров П.В. *Установка и способ производства эмульсий топливных смесей для получения взрывчатых веществ на основе отходов производства*. Патент РФ, RU2765548C1. Опубл. 01.02.2022. Режим доступа: https://patents.google.com/patent/RU2765548C1/ru (дата обращения: 22.02.2026).
6. Ефремовцев Н.Н., Жданов Ю.В., Андержанов С.Р., Левачев С.М., Харлов А.Е. *Состав взрывчатого вещества на основе эмульсии топливной смеси и способ его производства*. Патент РФ, RU2760534C2. Опубл. 26.11.2021. Режим доступа: https://patents.google.com/patent/RU2760534C2/ru (дата обращения: 22.02.2026).
7. Трубецкой К.Н., Ефремовцев Н.Н. О создании инновационных роботизированных геотехнологий формирования детонационных систем для повышения безопасности и эффективности взрывных работ. *Горная промышленность*. 2018;(5):62–64.
Trubetskoy K.N., Efremovtsev N.N. On the development of robotized geotechnologies of detonation systems formation for the improvement of safety and efficiency of blasting processes. *Russian Mining Industry*. 2018;(5):62–64. (In Russ.)
8. Ефремовцев Н.Н., Трубецкой К.Н., Жданов Ю.В. *Смесительно-зарядная машина для роботизированной технологии создания скважинных зарядов с переменной энергетической насыщенностью и способы формирования детонационных систем на их основе*. Патент РФ, RU2789093C2. Режим доступа: https://patents.google.com/patent/RU2789093C2/ru (дата обращения: 22.02.2026).

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

Информация о статье
Поступила в редакцию: 29.05.2026
Поступила после рецензирования: 01.07.2026
Принята к публикации: 06.07.2026

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 Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; e-mail: noee7@mail.ru

Article info
Received: 29.05.2026
Revised: 01.07.2026
Accepted: 06.07.2026