

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ДЕФОРМАЦИЙ В ВОЛНОВОМ ПОЛЕ, НАВЕДЕННОМ ВЗРЫВОМ УДЛИНЕННОГО ЗАРЯДА

Н.Н. Ефремовцев¹, В.А. Трофимов¹, И.Е. Шиповский¹

¹ Институт проблем комплексного освоения недр РАН, Москва, Россия,
e-mail: shipovskiy_i@ipkonran.ru

Аннотация: Для совершенствования методов управления взрывными работами рассмотрено применение комплексного подхода исследований действия взрыва. Данные, полученные в процессе физических экспериментов с композиционными имитационными моделями на полигоне в производственных условиях, сопоставляются с рассчитанными при компьютерном моделировании параметрами поведения геоматериалов при взрывных нагрузках. Показано, что используемая компьютерная модель обладает качествами, необходимыми для адекватного описания динамической прочности и разрушения геосреды в зависимости от напряжений, вида нагружения и скоростей деформации. Предложенная комплексная методика исследований позволяет всесторонне и наиболее информативно оценивать эффективность различных режимов взрыва, исследуя характер и кинетику развития деформаций, образования зон разрыхления, локализация которых предопределяет фрагментацию и образование осколков образцов. Особенности фрагментации зависят от типа взрывчатых веществ, что нашло отражение в статье. Кроме того, было количественно показано, что кинетика дробления во времени зарядами бризантного действия с высокой концентрацией энергии и скоростью детонации принципиально отличаются от показателей, получаемых с применением зарядов взрывчатых веществ щадящего действия.

Ключевые слова: взрывчатое вещество, удлиненный заряд, фрагментация, физические эксперименты, компьютерное моделирование, метод сглаженных частиц.

Благодарность: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 18-05-00912).

Для цитирования: Ефремовцев Н. Н., Трофимов В. А., Шиповский И. Е. Локализация деформаций в волновом поле, наведенном взрывом удлиненного заряда // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 8. – С. 73–85. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-8-0-73-85.

Strain concentration in wave field generated by blasting in elongated boreholes

N.N. Efremovtsev¹, V.A. Trofimov¹, I.E. Shipovskii¹

¹ Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources
of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, e-mail: shipovskiy_i@ipkonran.ru

Abstract: With a view to improving the blasting quality control, this article discusses an integrated approach to blast effect analysis. The data of physical tests of composite simulation models in a production environment are compared with the behavior parameters of geo-materials under explosive loads from computer modeling. The computer model is capable of the

adequate description of the dynamic strength and failure of geo-medium depending on stresses, type of loading and strain rates. The proposed integrated research procedure allows the comprehensive and most informative estimation of different modes of blasting by studying the patterns and kinetics of strains, and formation of shattering zones as concentration of the latter predetermines breaking and fragmentation of samples. The quality of fragmentation depends on the type of explosives, which is addressed in the article. Furthermore, it is quantitatively shown that the kinetics of time-dependent fragmentation by high explosives, with high energy and detonation velocity cardinally differs from the effect of gentle blasting.

Key words: explosive, elongated blastholes, fragmentation, physical tests, computer modeling, smoothed particle hydrodynamics.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, Grant No. 18-05-00912.

For citation: Efremovtsev N. N., Trofimov V. A., Shipovskii I. E. Strain concentration in wave field generated by blasting in elongated boreholes. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(8):73-85. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-8-0-73-85.

Введение

Проведение взрывных работ на объектах горного производства порождает масштабные выбросы взорванной горной массы, сейсмическим импульсом и ударной воздушной волной. На поверхности формируются развал горной массы с грансоставом от величин в несколько метров до нескольких микрон, то есть с разбросом по размеру в диапазоне пяти порядков.

Неоднородная фрагментация негативно влияет на последующие технологические процессы выемки, погрузки, транспортировки, дробления и обогащения. Образование негабарита увеличивает затраты на вторичное дробление. Переизмельчение горной массы приводит к увеличению потерь при разработке месторождений строительных материалов флюсового сырья, ценного кристаллосырья, а также снижению извлечения компонентов при добыче и переработке золотосодержащих руд.

В этой связи актуальной задачей остается развитие методологии управления действием взрыва с целью достижения оптимального гранулометрического состава при решении конкретных задач взрыва. Инженерная модель фрагмента-

ции представляет собой набор соотношений, которые определяют положение, форму фрагментов и распределение их по размерам [1 – 3]. Формирование такой модели, т.е. изучение вопроса управления энергией взрыва при дроблении горных пород, базируется на организации опытных взрывов в лабораторных условиях на моделях и полигонах в условиях реального массива с дальнейшей апробацией полученных зависимостей на производстве. Серия опытных взрывов при изменении плотности и типа ВВ позволяет с достаточной вероятностью судить о том, как мощность заряда ВВ влияет на интенсивность взрывного дробления.

Методика эксперимента

Методические аспекты экспериментальной оценки действия дробящего действия взрыва с применением имитационных композиционных моделей детально рассмотрены в работах [4 – 9].

Методика эксперимента, результаты которого использовались в данной работе, и имеющееся аппаратное обеспечение исследований (рис. 1 – 2) предполагают применение многоцветных песчано-цементных моделей цилиндриче-

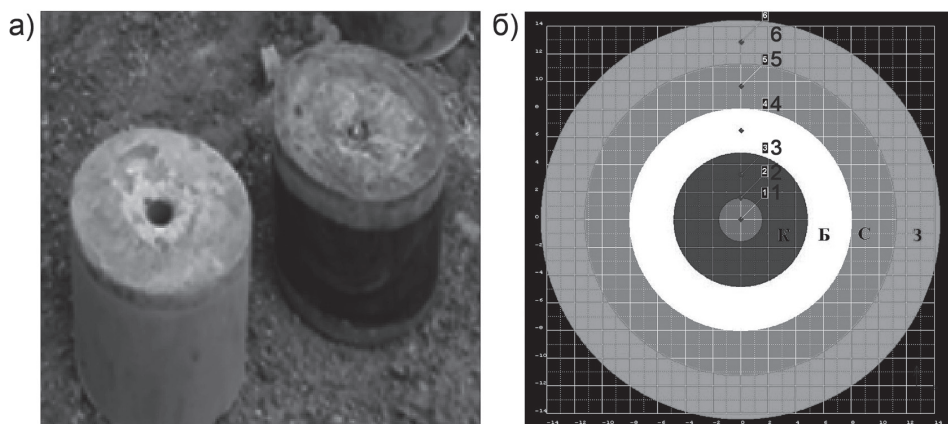


Рис. 1. Песчано-цементные модели для эксперимента в условиях полигона (а) и компьютерная модель (б)
 Fig. 1. Sand-cement models for the field experiment (a) and computer model (b)

ской формы с отверстием в центре для размещения заряда ВВ (рис. 1, а).

Песчано-цементная смесь модели в различных зонах действия взрыва окрашена в свой цвет, что после взрыва позволяет идентифицировать принадлежность осколков дробления модели той или иной ее зоне. Взрываема имитационная

модель с зарядом, забойкой и средствами инициирования размещается в полости испытательного стенда. Конструкция и схема разработанного в ИПКОН РАН стенда приведена на рис. 2.

Разработана методология системного анализа действия взрыва, а также «новая стандартная проба» для испытания за-



Рис. 2. Проведение работ на полигоне при одновременной оценке дробящего действия взрыва, показателей ударной воздушной волны и сейсмического эффекта (а); схема испытательного стенда (б): 1 – камера; 2 – ребра жесткости; 3 – зона разгрузки; 4 – емкость для сбора продуктов детонации; 5 – устройство для сбора проб газообразных продуктов детонации; 6 – клапан для сброса избыточного давления

Fig. 2. Carrying out work at the landfill while assessing the fragmenting effect of the explosion, indicators of the shock air wave and seismic effect (a); Scheme of the test bench (b): 1 – camera; 2 – stiffeners; 3 – unloading zone; 4 – capacity for collecting detonation products; 5 – a device for collecting samples of gaseous detonation products; 6 – valve for relieving excess pressure

рядов ВВ и формирования детонационных систем с заранее заданными свойствами [6 – 9]. Методика проводимых исследований включает в себя также и аналитические расчеты с применением разработанного комплекса зависимостей изменения взрывчатых характеристик от основных влияющих факторов. При этом для зарядов различного диаметра определяется скорость детонации с применением оптико-волоконного и контактного методов, рассчитывается теплота (в соответствии с составом компонентов) и результирующая скорость выделения энергии. С применением сейсмографа Minimate 3 Instante!, располагаемого на одинаковом расстоянии от зарядов, фиксируется векторная скорость и длительность сейсмического импульса, характеристики ударной воздушной волны. После проведения каждого взрыва производится сбор фрагментов имитационной модели, и затем в лабораторных условиях — оценка гранулометрического состава фрагментов модели в каждой зоне действия взрыва, выход мелких, средних и крупных фракций, а также уточняются фактические параметры зон действия взрыва, в том числе параметры зоны пластической деформации. Определяется состав вредных газов, показатели сейсмического действия взрыва и параметры ударной воздушной волны.

Полученные в ходе экспериментов данные о закономерностях поведения материала при взрывном воздействии на него являются важной составляющей при построении теории разрушения и дробления в горном деле, сравнительной оценки изменений дробящего и сейсмического действия испытываемых зарядов взрывчатых веществ с различной кинетикой выделения энергии. Тем не менее, эти данные весьма ограничены ввиду трудоемкости проведения соответствующих экспериментов.

Для расширения информативности метода, оценки кинетики фрагментации и физических показателей действия взрыва на разрушаемые среды было проведено компьютерное моделирование с использованием численной модели (рис. 1, б) [10, 11], которая по геометрическим и физическим свойствам соответствует задействованной в экспериментах имитационной композиционной физической модели (рис. 1, а). Фиксация результатов компьютерного моделирования под воздействием взрывных нагрузок осуществлялась в различные моменты времени с визуализацией в виде графиков и хронограмм разрушения и разлета фрагментов.

Компьютерное моделирование разрушения образца

Анализ преимуществ и недостатков различных аналитических и численных подходов определил в данной работе для описания фрагментации выбрать метод сглаженных частиц (Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH) [10, 12].

Как показала практика расчетов [10, 11], этот численный метод позволяет принять во внимание широкий спектр физических явлений, связанных с нелинейностью процесса нагружения [1 – 3] и с возможным нарушением сплошности материала.

Цели исследований, представленных в данной работе, можно сформулировать следующим образом:

- компьютерное моделирование процесса фрагментации взрывающегося образца при варьировании характеристик взрывчатого вещества;
- определение на основе численных экспериментов параметров фрагментации: скорости, характерного размера и распределения массы образующихся при взрыве кусков породы;
- вычисление некоторых практически неизмеримых на практике парамет-

ров, таких как напряжение и скорость деформации в характерных зонах.

Далее для формулировки краевой задачи рассмотрим уравнения состояния материалов, определяющие деформационные и прочностные соотношения, конфигурацию задачи, начальные и граничные условия.

Для описания ВВ и адиабатического расширения продуктов детонации принято стандартное уравнение состояния Джонса–Уилкинса–Ли (JWL) [1]. Уравнение представляет давление в виде функции:

$$p(\rho, e) = A \left(1 - \frac{\omega \eta}{R_1} \right) e^{-R_1/\eta} + B \left(1 - \frac{\omega \eta}{R_2} \right) e^{-R_2/\eta} + e \omega \eta, \quad (1)$$

где $\eta = \rho/\rho_e$ — отношение плотности продуктов детонации (ПД) к плотности заряда ВВ; e — удельная энергия детонации. A, R_1, B, R_2, ω — константы, значения которых для используемых ВВ определяются из взрывных экспериментов путем сравнения результатов численных расчетов функционирования различных взрывных устройств с экспериментальными данными.

Деформационное и прочностное поведение геоматериала оценивается критерием Друкера–Прагера, согласно которому при достижении предела упругости происходит переход к пластическому течению. При этом упругое поведение геоматериала следует закону Гука, задающему линейное соотношение между девиатором скоростей тензора напряжений и тензором скоростей деформации. Упругое состояние среды в пространстве напряжений ограничено поверхностью предельного состояния, при достижении которого начинается процесс неупругого, пластического деформирования, или разрушения.

$$f(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p) = 0, \quad (2)$$

где f — уравнение поверхности нагружения; σ_{ij} — тензор напряжений; ε_{ij}^p — тензор пластических деформаций. Пластическая деформация определяется из уравнения:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (3)$$

где $g(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p)$ — пластический потенциал; $d\lambda$ находится в ходе деформирования из условия пластичности:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 = 2Y^2, \quad (4)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ — главные напряжения; Y — предел упругости для простого растяжения.

При численном моделировании считалось, что при выбранной геометрии модели (рис. 2, б) для описываемого эксперимента благодаря протяженности удлиненного заряда в массиве реализуются условия плоской деформации и оценочные зависимости можно получить в двумерной геометрии.

Были установлены начальные и граничные условия, благодаря чему сформулирована краевая задача, в которой на поверхности полости для размещения заряда задавалось давление продуктов взрыва, которое получается в рамках решения этой же задачи с учетом детонации ВВ. Внешняя поверхность цилиндрической модели — свободная.

Обсуждение результатов

На рис. 3 показана фотография имитационной композиционной модели (а), разрушенной энергией взрыва заряда щадящего действия гранулированного ВВ на основе аммиачной селитры (АС), а также рассчитанное изображение (б) численной модели, разрушенной энергией взрыва с применением заряда ВВ на основе смеси АС и 6% дизельного топлива. Анализ этих изображений показывает достаточное сходство приведенных картин фрагментации.

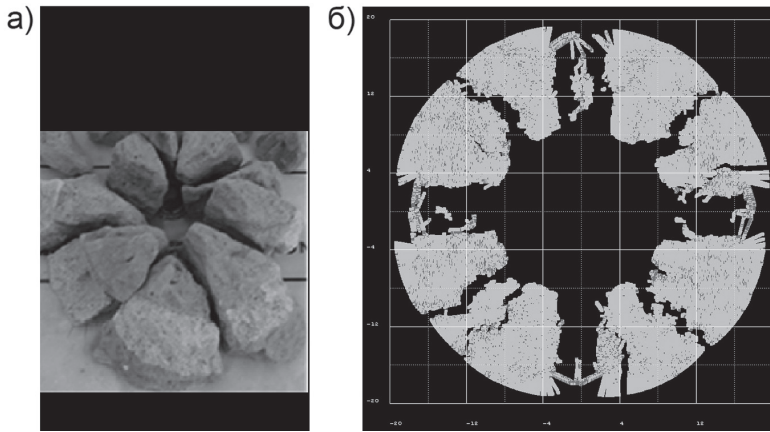


Рис. 3. Фотография имитационной композиционной модели, разрушенной зарядом ВВ щадящего действия (а); рассчитанная картина разрушаемой взрывом компьютерной модели с параметрами имитационной модели (б)

Fig. 3. Photograph of a simulation compositional model destroyed by a gentle explosive charge (a); calculated picture of a computer model destroyed by an explosion with the parameters of a simulation model (b)

При детонации удлиненного заряда взрывчатого вещества вдоль него распространяется плоская волна детонации, и образуются газообразные продукты взрыва с высоким давлением. При этом скорость детонации ВВ значительно выше скорости деформации породы, и по-

этому можно считать, что поверхность зарядной камеры (скважины или шпура) воспринимает действие взрыва одновременно по всей длине. Это приводит к тому, что создается давление продуктов детонации (ПД) (рис. 4), и оно определяет соответствующее напряженно-деформированное состояние в образце. Такого рода рассмотрение может служить обоснованием снижения размерности решаемой задачи и применения плоской модели в численном анализе.

Численные эксперименты показали смещение пика давления продуктов детонации при взрыве зарядов с различной скоростью выделения энергии (рис. 4).

На поверхности раздела «заряд-порода» детонационная волна переходит в ударную с весьма высокой амплитудой, вызывающую сильное измельчение породы в ближней зоне действия взрыва, находящейся в условиях всестороннего сжатия (рис. 5, а).

По мере удаления от заряда амплитуда волны резко снижается, и на расстоянии 5–6 радиусов заряда превращается в упругую волну напряжения. Скорость распространения ее меньше,

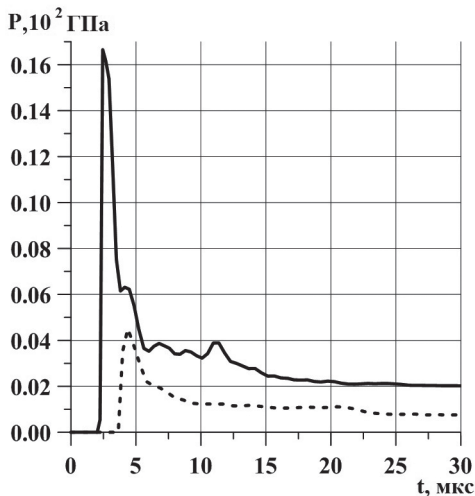


Рис. 4. Рассчитанное изменение давления продуктов детонации заряда ВВ на стенке скважины: сплошная — TNT; пунктир — АС/ДТ-6

Fig. 4. The calculated pressure change of the explosive charge detonation products on the well wall: continuous — TNT; dotted line — AN / DF-6

чем ударной, и равна скорости звука в разрушаемой взрывом среде. Однако амплитуда взрывной волны остается значительно выше прочности породы на раздавливание, вследствие чего после ее прохождения наблюдается интенсивное разрушение геоматериала, часто с потерей им первоначальной структуры (рис. 5, б). Эту зону принято характеризовать как зону измельчения или пластической деформации. Она обычно ограничена 2–7 радиусами заряда и зависит от скорости выделения энергии. Порода вблизи заряда под указанным воздействием взрывной волны и газов взрыва быстро сжимается и смещается вслед за фронтом волны напряжений. В результате этого образуется зона сильно деформированной породы с системой многочисленных трещин (рис. 5, в).

По мере удаления от заряда напряжение в породе от взрыва снижается и на определенном расстоянии сопротивления породы раздавливанию становятся меньше, вследствие чего характер деформации и разрушений меняется. После снижения давления газов в центре взрыва сильно сжатая порода будет

разгружаться и смещаться в сторону центра заряда, за счет чего условный радиус скважины уменьшится, а участки породы, прилегающие к ней, будут испытывать напряжения растяжения в радиальных направлениях. В результате этого в породе появляется ряд кольцевых тангенциальных трещин (рис. 5, г). Под действием прямой волны напряжений, отраженных волн и продуктов детонации, распространяющихся от заряда, в среде в радиальном направлении возникают сжимающие напряжения, а в тангенциальном — растягивающие, которые и вызывают появление радиальных трещин (рис. 5, д), которые формируют характерную зону равномерного управляемого дробления. Как показал анализ результатов промышленных взрывов и многочисленных экспериментов в условиях полигона, радиус зоны контролируемого дробления также зависит от скорости выделения энергии. Дробящее действие взрыва заканчивается в третьей зоне — интенсивно затухающего действия энергии взрыва, в которой наблюдаются как радиальные, так и тангенциальные системы трещин, расстояние

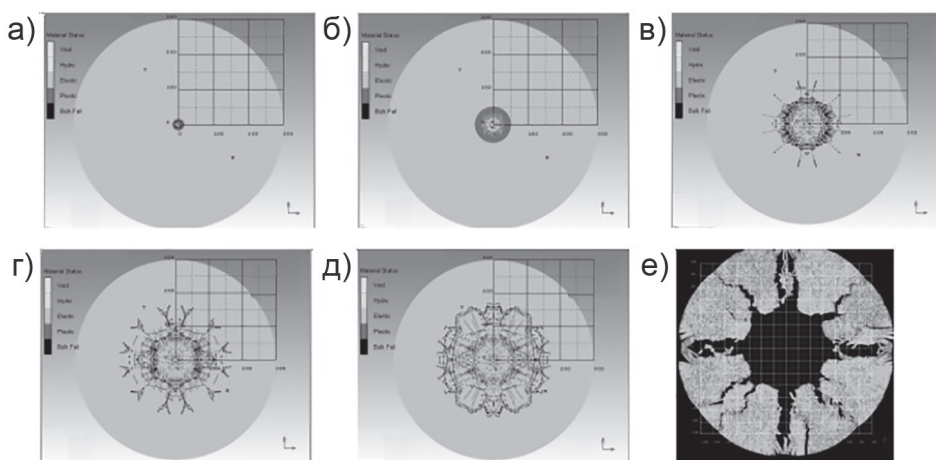


Рис. 5. Хронограмма локализации деформаций и развития разрушений в образце при подрыве скважинного заряда

Fig. 5. Chronogram of the localization of deformations and the development of fractures in the sample when the borehole blast

между которыми значительно больше, чем во второй зоне действия взрыва. Для третьей зоны характерен резкий рост среднего размера куска взорванной горной массы. Радиус выделенных вокруг заряда зон увеличивается с ростом скорости выделения энергии зарядов ВВ.

При дальнейшем удалении волн деформации от заряда растягивающие тангенциальные напряжения уменьшаются и становятся меньше величины сопротивления породы растяжению. Поэтому за пределами этого расстояния разрушений происходить не будет, а будут иметь место сейсмические колебания.

Разрушаемая энергией взрыва среда деформируется, и под воздействием наведенного НДС через некоторое время разрывается из-за сдвига или растяжения. Как только материал образца разрывается, наблюдается разлет фрагментов в направлениях, зависящих от начального угла отклонения, скорости, их индивидуальной массы и геометрии (рис. 5, е).

Детальный анализ гранулометрического состава фрагментов разрушенных имитационных моделей в различных зонах действия взрыва показал, что массив-

ные фрагменты образуются около внешней поверхностей образца в зоне забойки и в зоне, расположенной ниже заряда. Небольшие фрагменты (5–10 мм) формируются во всех зонах действия взрыва, в том числе за счет соударения фрагментов между собой. Переизмельчение материала и образование фракций менее 5 мм наблюдается преимущественно в ближней зоне действия взрыва.

Анализ рассчитанных параметров

В результате компьютерного моделирования для зарядов бризантного и щадящего действия были получены следующие зависимости:

- изменение во времени давления продуктов детонации в скважине (рис. 4);
- изменения массовой скорости разрушаемой среды в каждой выделенной своим цветом зоне модели (рис. 6);
- графики изменения во времени численных значений радиальных напряжений в различных зонах модели при взрыве зарядов ТНТ и АС/ДТ-6 (рис. 7);
- графики изменения во времени численных значений тангенциальных

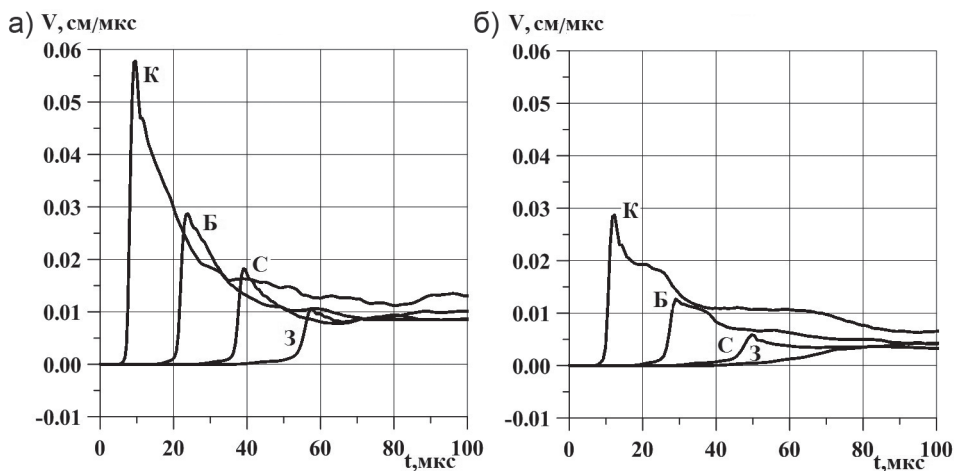


Рис. 6. Изменения массовой скорости в выделенных зонах: для заряда, содержащего тротил ТНТ бризантного действия (а); для заряда мягкого действия — АС/ДТ-6 (б)

Fig. 6. Changes in mass velocity in the selected zones: for a trotil-containing TNT blasting charge (a); for a soft-acting charge — AN/DF-6 (b)

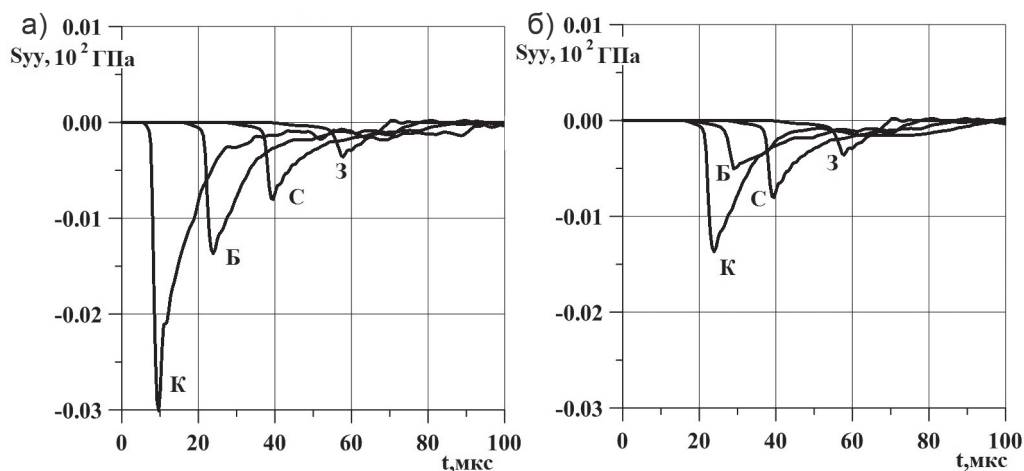


Рис. 7. Численные значения и кинетика радиальных напряжений в различных зонах модели: заряд бризантного действия (ТНТ) (а); заряд щадящего действия на основе аммиачной селитры (б)

Fig. 7. Numerical values and kinetics of radial stresses in different zones of the model: blasting charge (TNT) (a); a charge of gentle action based on ammonium nitrate (b)

напряжений в различных зонах модели при взрыве зарядов ТНТ и АС/ДТ-6 (рис. 8).

Анализ полученной информации показывает, что максимальные значения давления продуктов детонации заряда бризантного действия (ТНТ) и щадящего действия отличаются в 4 раза (рис. 4). При этом пик давления заряда щадя-

щего действия смещен во времени на более поздний период. Зависимость изменения во времени давления продуктов детонации нелинейная, достаточно быстро убывающая в начальный период времени по гиперболическому закону. За 30 мкс давление падает в 8 раз от 16 ГПа до 2 ГПа для ТНТ. Для АС/ДТ-6 это падение менее выражено.

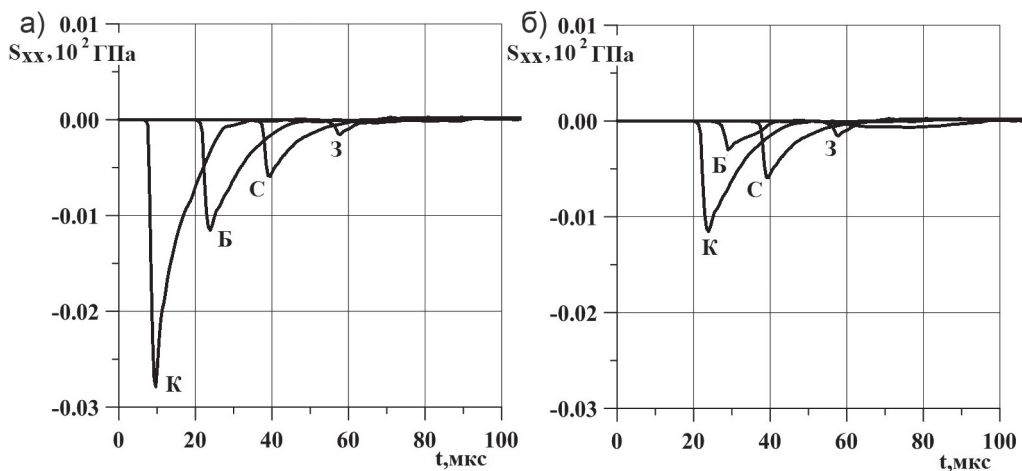


Рис. 8. Численные значения и кинетика тангенциальных напряжений в зонах модели: для заряда бризантного действия (ТНТ) (а); для заряда щадящего действия на основе аммиачной селитры (б)

Fig. 8. Numerical values and kinetics of tangential stresses in the model zones: for the blasting action charge (TNT) (a); for a gentle charge based on ammonium nitrate (b)

Зависимости изменения массовой скорости (рис. 6) во времени с увеличением расстояния до заряда также нелинейные, гиперболически убывающие. Значения показателей в средних точках в каждой из выделенных зон модели (обозначены буквами К, Б, С, З) отличаются в два раза, что обусловлено выбором размеров этих зон. При этом численные значения показателей для заряда ТНТ в два раза выше, чем для ВВ АС/ДТ-6 в каждой из зон.

Отметим, что по прошествии некоторого времени (для ТНТ — ~60 мкс) скорости во всех зонах выравниваются, т.е. все точки массива в пределах модели начинают двигаться практически с одинаковой скоростью — ~0,01 см/мкс.

На рис. 7 и 8 приведены графики изменения во времени численных значений радиальных и тангенциальных напряжений в различных зонах модели. Анализ полученных данных показывает, что характер изменения радиальных и тангенциальных напряжений во времени одинаков. Численные значения в соседних зонах независимо от исполь-

зуемого ВВ отличаются приблизительно в два раза.

Отметим, что для ТНТ по прошествии ~60–70 мкс массив разгружается до величин, значения которых используемая численная модель не улавливает в силу ограничения по точности.

На рис. 9 точками показан расчет роста со временем числа разрушенных энергией взрыва фрагментов зарядами бризантного ВВ — ТНТ и АС/ДТ-6. При этом начало дробления (фрагментации) имитационной модели с применением зарядов щадящего действия оказывается смещенным во времени на 400 мкс в сравнении с взрывом бризантного ВВ. Абсолютные значения числа фрагментов модели, разрушенных с применением зарядов бризантного действия (ТНТ), в 13–15 раз больше, чем фрагментов модели, разрушенной зарядом щадящего действия. Зависимости роста числа фрагментов под воздействием энергии взрыва в начальный промежуток времени имеют нелинейный характер от времени: полиномиальный для ТНТ и экспоненциальный для АС/ДТ-6. Очевидно,

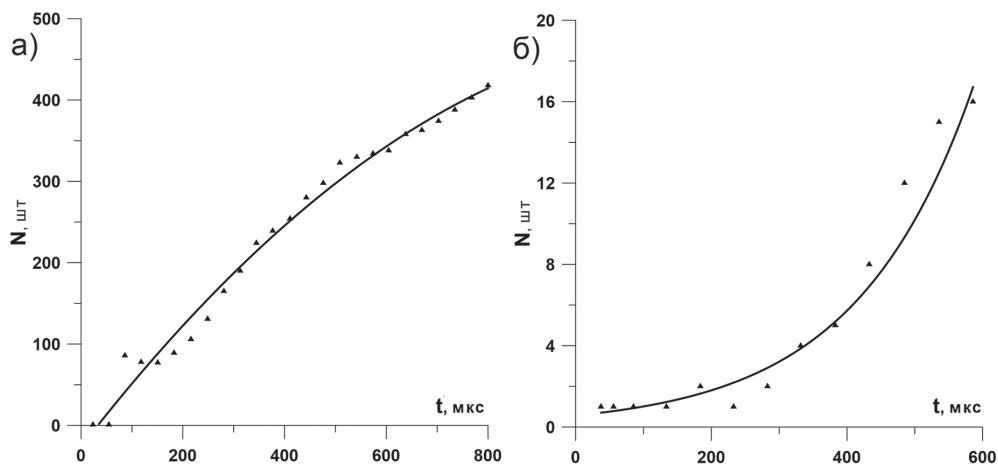


Рис. 9. Графики изменения во времени рассчитанного суммарного числа фрагментов имитационной модели при воздействии энергией взрыва дробящего действия с применением бризантного ВВ — ТНТ (а) и для взрыва щадящего действия (б)

Fig. 9. Graphs of the time variation of the calculated total number of fragments of the simulation model when exposed to explosive energy using a blasting action using a blasting explosive — TNT (a) and for a blasting sparing action (b)

что при больших временах эти кривые должны иметь горизонтальную асимптоту ввиду затухания процесса и ограниченности общего количества фрагментов.

На рис. 10 приведены графики изменения во времени скорости изменения числа фрагментов имитационной модели при взрыве заряда ТНТ и щадящего действия. Анализ полученных данных показал, что кинетика дробления во времени зарядами бризантного действия с высокой концентрацией энергии и скоростью детонации (и соответственно высокой скоростью выделения энергии) принципиально отличаются от показателей, получаемых с применением зарядов ВВ щадящего действия.

Максимальные значения скорости фрагментации для зарядов ТНТ приходятся на начальный период действия взрыва, а при применении зарядов щадящего действия максимальные значения скорости фрагментации наблюдаются на последующих этапах воздействия энергии взрыва на разрушаемую среду преимущественно в результате соударения.

Основные выводы

Большой разброс и недоступность многих видов данных, описывающих стендовый эксперимент по взрыву удлиненного заряда в образце, вряд ли могут быть устранены даже при использовании высокотехнологичного оборудования. В этой связи численное моделирование разрушающего действия взрыва в совокупности с физическими экспериментами в условиях полигона и с промышленными взрывами может решить многие проблемы. Результаты описанного в работе комплексного экспериментально-численного подхода к исследованиям действия взрыва могут быть весьма полезны для понимания процессов разрушения и дробления горной породы,

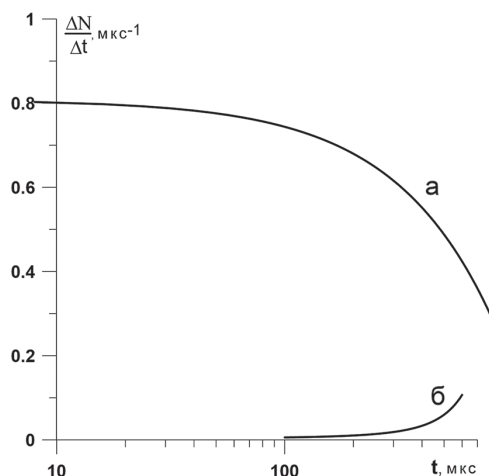


Рис. 10. Изменение скорости фрагментации имитационной модели во времени с момента инициирования заряда бризантного ВВ – ТНТ (а) и гранулированного АС/ДТ-6 (б)

Fig. 10. Change in the fragmentation rate of the simulation model in time from the moment of initiation of the blasting explosive – TNT charge (a) and for the gentle blasting of granular AN / DF-6 (b)

в частности, уточнения паспортов буровзрывных работ, обоснованного выбора применяемых средств разрушения и конструкций детонационных систем.

Кроме того, нужно подчеркнуть, что данная работа важна с точки зрения демонстрации возможности метода SPH в решении проблемы задания нужной фрагментации и определения грансостава при взрывных работах. Результаты более подробного статистического анализа вычисленных параметров, например, совершенствование аналитического аппарата прогнозирования фрагментации горной массы в различных условиях и другие соответствующие статистические параметры для оценки процесса фрагментации, в данной работе не приведены и могут составлять предмет дальнейших исследований.

Используемый численный подход на основе SPH способен определить большое разнообразие параметров фрагментации, такие как скорость и кинетическую энергию фрагментов, их размер

и массу, а также вероятностное распределение массы фрагментов. Кроме того, некоторые характеристики НДС и фрагментации, например, температура, напряжение, деформации и скорости

деформации в материале образца, недоступные для измерений в реальных экспериментах, без затруднений определяются при компьютерном моделировании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев С. Г., Бабкин А. В., Баум Ф. А. и др. Физика взрыва / Под ред. Л. П. Орленко. Изд. 3-е, испр. Т. 2. — М.: Физматлит, 2004. — 656 с.

2. Mott N. F. A theory of the fragmentation of shells and bombs / Fragmentation of rings and shells. Shock wave and high pressure phenomena. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-540-27145-1_11.

3. Ouchterlony F., Sanchidrian J. A. A review of development of better prediction equations for blast fragmentation // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019. Vol. 11. No 5. DOI: 10.1016/j.jrmge.2019.03.001.

4. Johnson C. E. Fragmentation analysis in the dynamic stress wave collision regions in bench blasting. 2014. Theses and Dissertations. Mining Engineering, 16, 173 p. https://uknowledge.uky.edu/mng_etds/16.

5. Kukolj I., Oberdorfer B., Ouchterlony F. Internal fractures after blasting confined rock and mortar cylinders // Berg Huettenmaenn Monatsh. 2019. Vol. 164. No 10. Pp. 422–430. DOI: 10.1007/s00501-019-00899-6.

6. Ефремовцев Н. Н. Методические вопросы исследования дробящей способности взрывчатых веществ // Взрывное дело. — 2015. — № 113 (70). — С. 96–106.


7. Ефремовцев Н. Н., Ефремовцев П. Н. Результаты исследования в производственных условиях влияния кинетики выделения энергии взрыва на дробимость горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — СВ 58. — С. 17–25.

8. Викторов С. Д., Закалинский В. М., Ефремовцев Н. Н. Применение инновационных технологий управления действием взрыва для повышения эффективности разработки месторождений стратегического сырья / Решение технологических проблем горного производства на территории России, ближнего и дальнего зарубежья. — М.: ВНИПИпромтехнологии, 2018. — С. 8–14.

9. Efremovtsev N. N. Aspects of the research into the methods of blast effect control with the use of compositional simulation models and scientific classification / 9th International Conference on Physical Problems of Rock Destruction. Proceedings. 2017. Pp. 134–139.

10. Шиповский И. Е. Расчет хрупкого разрушения горной породы с использованием бессеточного метода // Научный вестник НГУ. — 2015. — Вып. 1 (145). — С. 76–82.

11. Одинцев В. Н., Шиповский И. Е. Моделирование влияния взрывного воздействия на газодинамическое состояние пачки выбросоопасного угля // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2019. — № 4. — С. 46–57. DOI: 10.15372/FTPRP120190406.

12. Abdalla M. A. Fragmentation Analysis of OG-7 Warhead Using AUTODYN SPH Solver // Advanced Materials Research. 2012. Vol. 576. Pp. 645–650. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.576.645. 

REFERENCES

1. Andreev S. G., Babkin A. V., Baum F. A. Fizika vzryva. Pod red. L. P. Orlenko. Izd. 3-e. T. 2 [Explosion physics. Orlenko L. P. (Ed.), 3rd edition, vol. 2], Moscow, Fizmatlit, 2004, 656 p.

2. Mott N. F. A theory of the fragmentation of shells and bombs. *Fragmentation of rings and shells. Shock wave and high pressure phenomena*. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-540-27145-1_11.

3. Ouchterlony F., Sanchidrian J.A. A review of development of better prediction equations for blast fragmentation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019. Vol. 11. No 5. DOI: 10.1016/j.jrmge.2019.03.001.

4. Johnson C. E. *Fragmentation analysis in the dynamic stress wave collision regions in bench blasting*. 2014. Theses and Dissertations. Mining Engineering, 16, 173 p. https://uknowledge.uky.edu/mng_etds/16.

5. Kukulj I., Oberdorfer B., Ouchterlony F. Internal fractures after blasting confined rock and mortar cylinders. *Berg Huettenmaenn Monatsh*. 2019. Vol. 164. No 10. Pp. 422 – 430. DOI: 10.1007/s00501-019-00899-6.

6. Efremovtsev N.N. Methodological questions from the study of the crushing ability of explosives. *Vzryvnoe delo*. 2015, no 113 (70), pp. 96 – 106. [In Russ].

7. Efremovtsev N.N., Efremovtsev P.N. The results of the study in production conditions of the influence of the kinetics of the release of explosive energy on the crushability of rocks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015. Special Edition 58, pp. 17 – 25. [In Russ].

8. Viktorov S.D., Zakalinskiy V.M., Efremovtsev N.N. The use of innovative technologies for controlling the action of an explosion to increase the efficiency of developing deposits of strategic raw materials. *Reshenie tekhnologicheskikh problem gornogo proizvodstva na territorii Rossii, blizhnego i dal'nego zarubezh'ya* [Solution of technological problems of mining in Russia, at near and far abroad], Moscow, VNIPIpromtekhologii, 2018, pp. 8 – 14.

9. Efremovtsev N.N. Aspects of the research into the methods of blast effect control with the use of compositional simulation models and scientific classification. *9th International Conference on Physical Problems of Rock Destruction*. Proceedings. 2017. Pp. 134 – 139.

10. Shipovskii I. E. Simulation for fracture by smooth particle hydrodynamics code. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2015, issue 1 (145), pp. 76 – 82. [In Russ].

11. Odintsev V.N., Shipovskii I. E. Simulating explosive effect on gas-dynamic state of outburst-hazardous coal band. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2019, no 4, pp. 46 – 57. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20190406.

12. Abdalla M.A. Fragmentation Analysis of OG-7 Warhead Using AUTODYN SPH Solver. *Advanced Materials Research*. 2012. Vol. 576. Pp. 645 – 650. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.576.645.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ефремовцев Никита Николаевич¹ – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, e-mail: efremovtsev_n@ipkonran.ru,

Трофимов Виталий Александрович¹ – д-р техн. наук, зав. лабораторией, e-mail: trofimov.v@ipkonran.ru,

Шиповский Иван Евгеньевич¹ – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, e-mail: shipovskiy_i@ipkonran.ru,

¹ Институт проблем комплексного освоения недр РАН.

Для контактов: Шиповский И.Е., e-mail: shipovskiy_i@ipkonran.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

N.N. Efremovtsev¹, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, e-mail: efremovtsev_n@ipkonran.ru, V.A. Trofimov¹, Dr. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, e-mail: trofimov.v@ipkonran.ru,

I.E. Shipovskii¹, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, e-mail: shipovskiy_i@ipkonran.ru,

¹ Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russia.

Corresponding author: I.E. Shipovskii, e-mail: shipovskiy_i@ipkonran.ru.

Получена редакцией 27.02.2020; получена после рецензии 16.03.2020; принята к печати 20.07.2020.

Received by the editors 27.02.2020; received after the review 16.03.2020; accepted for printing 20.07.2020.