

УДК 662.2-391.4:544.454.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕИДЕАЛЬНОЙ ДЕТОНАЦИИ АЛЮМИНИЗИРОВАННЫХ ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

C. Yi^{1,2}, U. Nyberg^{1,2}, D. Johansson^{1,2}, C. R. San Miguel^{1,2}¹ Division of Mining and Geotechnical Engineering, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden,
changping.yi@ltu.se² Swedish Blasting Research Centre (Swebrec), Luleå, Sweden

Эмульсионные взрывчатые вещества демонстрируют сильное неидеальное поведение при детонации. Их взрывное действие обычно увеличивается при добавлении алюминиевого порошка. Была проведена серия испытаний эмульсионных взрывчатых веществ с добавкой 5 % алюминиевого порошка в оболочке из цемента. Определялись скорость детонации и профиль фронта детонации зарядов различных диаметров. С использованием результатов этих экспериментов проведено численное исследование детонационных свойств алюминизированных эмульсионных взрывчатых веществ по модели воспламенения и роста очагов (I&G). Впервые разработана процедура, объединяющая программу оптимизации LS-OPT с гидрокодом LS-DYNA, для определения параметров модели I&G. Рассчитаны детонационные давление и температура для зарядов разного диаметра. Результаты согласуются с опубликованными данными.

Ключевые слова: алюминизированное эмульсионное взрывчатое вещество, неидеальная детонация, эксперимент, модель воспламенения и роста, оптимизация параметров.

DOI 10.15372/FGV2023.9326
EDN UROCSH

ВВЕДЕНИЕ

Эмульсионные взрывчатые вещества (ВВ), которые широко используются в горнодобывающей промышленности, обладают многими преимуществами, такими как безопасность и надежность, превосходная водостойкость и низкий уровень выбросов опасных газов. Хорошо известно, что эмульсионные ВВ демонстрируют сильное неидеальное поведение при детонации. Детонационная волна распространяется с меньшим давлением и меньшей скоростью, чем в случае идеальной детонации. Действие эмульсионных ВВ зависит от различных факторов, в том числе от диаметра заряда, плотности и материала оболочки [1–5].

Показано, что добавление алюминия улучшает действие взрыва ВВ. Проведено множество экспериментальных и численных исследований по изучению детонационных свойств алюминизированных ВВ [6–9].

Детонационные характеристики ВВ оказывают существенное влияние на действие взрыва. Для того чтобы оптимизировать эффективность взрывных работ, важно знать де-

тонационные свойства ВВ, помещенных в замкнутую среду. Неидеальные свойства ВВ не могут быть точно описаны идеальными моделями детонации, такими как модель Чепмена — Жуге, в которой детонационный процесс рассматривается как одномерная волна с фронтом бесконечно малой толщины. При этом потеря массы, импульса или энергии, а также вязкость среды не учитываются [10]. Для описания детонации неидеальных ВВ было предложено несколько неидеальных моделей детонации и/или теорий [1, 11–14], разработан метод определения параметров JWL неидеальных ВВ по результатам подводного взрыва. В работе [15] представлен подход к теории стационарной неидеальной детонации, разработанный на основе анализа линий тока. Обзор существующих моделей неидеальной детонации приведен в [13].

Кинетическая модель воспламенения и роста очагов разложения (I&G) популярна при изучении ударного инициирования и неидеальности ВВ [9, 16]. Модель была реализована в нескольких гидродинамических программных пакетах, таких как LS-DYNA [17]. Однако в функции скорости реакции модели I&G име-

ется пятнадцать неизвестных параметров. Их необходимо определить с помощью итерационной процедуры так, чтобы они соответствовали экспериментальным результатам. Процесс получения набора подходящих параметров для конкретного ВВ часто занимает много времени. В работе [18] использовались методы последовательного квадратичного программирования для оптимизации параметров кинетической модели I&G. Авторы [19] соединили алгоритм оптимизации дифференциальной эволюции с гидрокодом ALE3D для параметризации модели I&G. Код LS-OPT использован в [20, 21] для определения параметров кинетической модели I&G на основе результатов по ударно-волновому инициированию путем сравнения экспериментальных и рассчитанных профилей давление — время.

В данной работе проведена серия экспериментов по определению скорости детонации D и формы фронта детонационной волны эмульсионного ВВ с добавлением 5 % Al при различных диаметрах зарядов в оболочке из цемента. Для определения параметров скорости реакции в кинетической модели I&G разработана процедура, объединяющая пакет программного обеспечения для оптимизации LS-OPT с гидрокодом LS-DYNA. Параметры определяются путем сравнения экспериментальных и расчетных значений скорости детонации D и радиуса кривизны фронта детонации R . Код постобработки LS-PREPOST программы LS-DYNA не может напрямую определять значения D и R . Для их расчета был разработан код Perl, объединенный с кодом LS-OPT. Определенные параметры кинетической модели использовались для изучения влияния диаметра заряда на давление и температуру детонации алюминизированного эмульсионного ВВ.

1. ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Проведена серия экспериментов с эмульсионным ВВ E682 с добавлением 5 % Al в зарядах различного диаметра. Состав испытанного ВВ представлен в табл. 1. Размер частиц Al варьировался от 0.1 до 0.3 мм. Форма частиц алюминия неправильная чешуйчатая.

Для имитации горных условий и уменьшения влияния граничных эффектов все ВВ были заключены в оболочки из цемента. Состав материала оболочки указан в табл. 2 [22]. Установка для измерения формы фронта детонации и измерения скорости детонации по-

Таблица 1
Состав эмульсии E682 с 5 % алюминия

Компонент	Содержание, % (мас.)
Раствор солей:	
вода	12.72
натриевая селитра	12.47
аммиачная селитра	61.66
Эмульгатор (Span 80)	2.00
Масло (Nytex 810)	2.65
Алюминий (Hoesch)	5.00
Микросфера (3M)	3.50
Расчетная плотность	1 150 кг/м ³

Таблица 2
Состав материала оболочки

Ингредиент	Содержание, % (мас.)
Портландцемент	25.6
Вода	12.6
Глиниум 51 (пластификатор)	0.3
Трибутилfosфат (пеноудалитель)	0.1
Порошок магнетита	29.7
Кварцевый песок	31.7
Плотность	2 510 кг/м ³

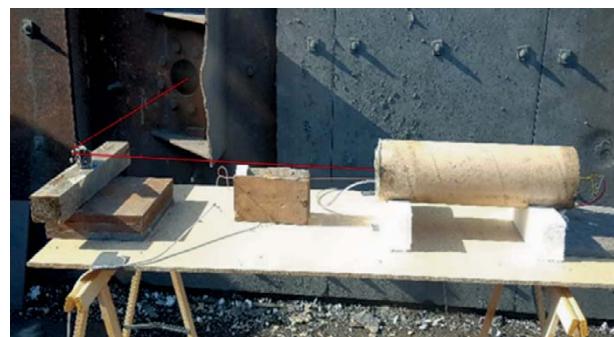


Рис. 1. Экспериментальная установка для измерения формы детонационного фронта и скорости детонации

казана на рис. 1. Внешний диаметр оболочки 150 мм. Испытывались заряды диаметром 25, 40, 50 и 65 мм, по два эксперимента с каждым диаметром.

Испытуемый заряд помещался на стол и выравнивался с помощью строительного лазерного инструмента и пенополистирола между оболочкой и столом (см. рис. 1). Камера с щелевой разверткой, установленная в безопасном месте, регистрировала свет от фронта детонации, отраженный от зеркала в сторону объектива камеры. В качестве зеркала использовалось плоское листовое стекло размером 38 × 150 мм с алюминиевым покрытием (коэффициент отражения >90 % в диапазоне длин волн 400 ÷ 650 нм). Камера снабжена ПЗС-матрицей и врачающимся зеркалом. Для работы камеры требуется высокая интенсивность света, которая обеспечивается аргоновой вспышкой, расположенной на стороне заряда, направленной к камере. Аргон испускает интенсивный свет, когда он находится под большим давлением, вызванным, например, детонацией. Аргоновая вспышка состоит из двух пластин из ПММА толщиной 1 мм с небольшим зазором 0.2 мм между ними. Перед экспериментом заряд фотографировался, чтобы иметь информацию о масштабе и для совмещения центральной оси заряда с осью объектива камеры. Заряд инициировался автоматически электродетонатором (EBW RP80 или RP 501) и системой инициирования EBW, срабатывающей от камеры. Сигнал запуска от камеры (т. е. время инициирования) устанавливался таким образом, чтобы свет от выходящей детонационной волны записывался на ПЗС-матрице камеры. Основными факторами надежной регистрации данных являются стабильная установка заряда, однородное ВВ, аргоновая щель и высокое качество оптических компонентов. Скорость детонации непрерывно измерялась с помощью датчика (MREL Co.) длиной 1 м, расположенного вдоль внутренней стенки оболочки.

На рис. 2, а показаны детали торцевой поверхности заряда, а на рис. 2, б — профиль фронта детонации, как он отображается на ПЗС-матрице камеры.

Зафиксированные изображения формы фронта детонации аппроксимировались эллиптической функцией вида [23]

$$Z^2(R) = aR^2 + bR + c, \quad (1)$$

где R , Z — радиальная и осевая координаты

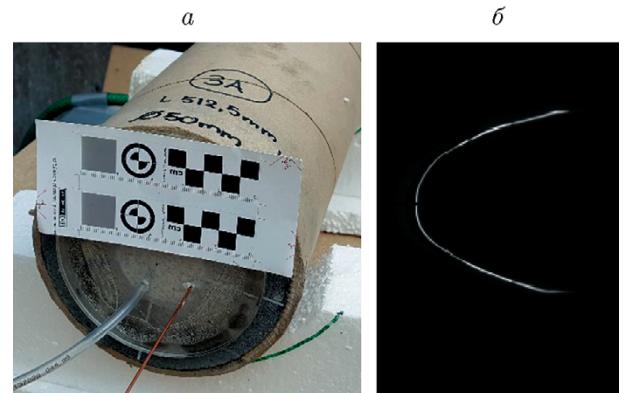


Рис. 2. Торец заряда с аргоновой щелью и профиль свечения поверхности

соответственно, a , b , c — подгоночные константы. Кривизна профиля детонационного фронта рассчитывалась по уравнению [23]

$$k(R) = \frac{|Z''(R)|}{(1 + Z'(R)^2)^{3/2}}. \quad (2)$$

Радиус кривизны вычислялся как величина, обратная кривизне.

2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕИДЕАЛЬНОЙ ДЕТОНАЦИИ АЛЮМИНИЗИРОВАННОГО ЭМУЛЬСИОННОГО ВВ

2.1. Кинетическая модель воспламенения и роста очагов

Кинетическая модель I&G в коде LS-DYNA была построена в работе [24] и усовершенствована в [25, 26]. Хотя модель изначально разрабатывалась для изучения чувствительности идеальных мощных ВВ, она, по существу, моделирует поведение неидеальных ВВ. Кинетическая модель I&G включает в себя два уравнения состояния, одно для непрореагированного ВВ, а другое для продуктов детонации. Оба уравнения состояния имеют форму JWL [27]:

$$P = A \exp(-R_1 V) + \\ + B \exp(-R_2 V) + \omega C_V T / V, \quad (3)$$

где P — давление, V — относительный объем, T — температура, ω — коэффициент Грюнайзена, C_V — средняя теплоемкость, A , B , R_1 , R_2 — константы.

Параметры двух уравнений состояния JWL для продуктов детонации и непрореагированного ВВ могут быть определены экспериментально. Параметры JWL для непрореагированного алюминизированного эмульсионного ВВ подобраны по данным для ВВ близкого состава [28] и составляют: $\rho = 1.15 \text{ г}/\text{см}^3$, $A = 594.13 \text{ Мбар}$, $B = -0.04 \text{ Мбар}$, $R_1 = 19.19$, $R_2 = 1.28$, $\omega = 2.52$, $C_V = 1.48 \cdot 10^{-5} \text{ Мбар}/\text{К}$. Параметры JWL продуктов детонации ВВ близкого состава и плотности взяты из [29]: $A = 2.628 \text{ Мбар}$, $B = 0.079 \text{ Мбар}$, $R_1 = 5.215$, $R_2 = 2.212$, $\omega = 0.501$, $E_0 = 0.0383 \text{ Мбар}$. Обращаем внимание, что данные из работ [28, 29] относятся к эмульсионному ВВ E682 с добавлением 6 % Al и плотностью $1.180 \text{ г}/\text{см}^3$, что немного отличается от ВВ, испытанного в статье.

Правило смеси, используемое в модели, задается уравнением [30]

$$V = (1 - F)V_e + FV_p, \quad (4)$$

где V_e — относительный объем непрореагированного ВВ, а V_p — относительный объем прореагированного ВВ. Параметр F представляет собой долю прореагированного ВВ, где завершение реакции означает, что $F = 1$, а отсутствие реакции означает, что $F = 0$. Этот параметр рассчитывается по уравнению скорости реакции I&G. Закон скорости реакции состоит из трех членов, каждый из которых действует при различных значениях доли прореагированного вещества. Этот трехчленный закон скорости

$$\frac{dF}{dt} = I(1 - F)^b \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 - a \right)^x + G_1(1 - F)^c F^d P^y + G_2(1 - F)^e F^f P^z \quad (5)$$

описывает три стадии реакции, обычно наблюдаемые при ударном инициировании и детонации гетерогенных конденсированных ВВ [30]. Здесь t — время, ρ_0 — начальная плотность, ρ — текущее значение плотности, P — давление, I , b , a , x , G_1 , c , d , y , G_2 , e , f , z — константы для слагаемого, описывающего воспламенение, и двух слагаемых, отвечающих за рост очагов. В модель добавлены еще три константы, которые ограничивают вклад каждого из трех слагаемых: F_{mxig} — максимальная прореагированная доля для первого слагаемого, F_{mxgr} — максимальная доля для второго слагаемого, F_{mngr} — минимальная доля

для последнего слагаемого. Для моделирования детонации ВВ первый член реакции представляет воспламенение ВВ, когда оно сжимается ведущей ударной волной, создавая нагретые области (горячие точки) при схлопывании пор в материале. Доля воспламененного ВВ примерно равна исходному объему пор. Второй член реакции описывает быстрое образование основных газообразных продуктов реакции (CO_2 , N_2 , H_2O , CO и т. д.) с сильно возбужденными колебательными степенями свободы и их последующее расширение и установление в них равновесия. Третье слагаемое используется для описания относительно медленного, определяемого диффузией образования твердых углеродных частиц в форме алмаза, графита или аморфного углерода [31].

В кинетической модели пятнадцать неизвестных параметров. Чтобы их определить, необходимо провести итерационное численное моделирование с использованием кода LS-DYNA, корректируя параметры и повторяя вычисления до тех пор, пока не будет получено наилучшее соответствие экспериментальным результатам [32].

2.2. Модель материала оболочки Риделя — Хирмайера — Тома

Испытания ВВ проводились в оболочке из цемента. Поведение цемента в LS-DYNA описывается моделью материала Риделя — Хирмайера — Тома, которая учитывает пластичность и разрушение хрупких материалов, таких как бетон и камень [33], а также учитывает скорость деформации. Некоторые основные параметры цемента заимствованы из работы [22]: плотность $\rho = 2511 \text{ кг}/\text{м}^3$, модуль упругости $E = 21.9 \text{ ГПа}$, прочность на одноосное сжатие $\sigma_c = 50.7 \text{ МПа}$, коэффициент Пуассона $\mu = 0.3$.

2.3. Определение параметров для кинетической модели I&G

Определение параметров кинетической модели проводилось с помощью программы LS-OPT. Выполнено две серии экспериментов с зарядами диаметром 25 и 65 мм. Для расчета строилась осесимметричная модель заряда. Схема численной модели с промежуточным зарядом из тэна показана на рис. 3. Как упоминалось ранее, в уравнении (5) пятнадцать неизвестных параметров. Три из них

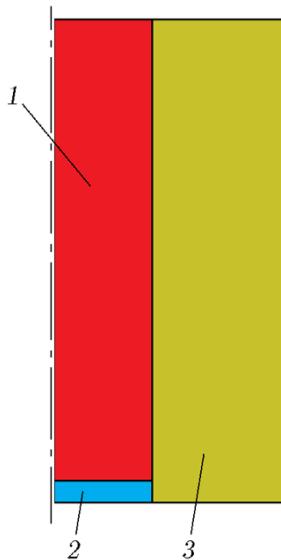


Рис. 3. Численная модель для заряда диаметром 65 мм:

1 — алюминизированное эмульсионное ВВ, 2 — промежуточный заряд из тэна, 3 — оболочка из цемента

в данном исследовании заимствованы из [30]: $b = 0.667$, $c = 0.333$, $d = 0.667$. Остальные двенадцать параметров были найдены. Для каждого параметра установлен диапазон допустимых значений. Результатом численного моделирования были скорость детонации D и радиус кривизны фронта детонации при $R = 0$ из уравнения (2).

Определение параметров является часто используемой функцией LS-OPT. Процедура состоит в минимизации разницы между целевыми значениями и выходными значениями. В данной работе целевыми значениями являются измеренные скорость детонации и радиус кривизны фронта детонации на оси симметрии для зарядов различных диаметров, а выходными значениями — соответствующие рассчитанные величины. В LS-OPT разница между измеренными и рассчитанными значениями определяется как целевая функция [21]. Для минимизации целевой функции использовался алгоритм аддитивной имитации отжига [34].

LS-PREPOST не может напрямую выводить значения D и R на этапе постобработки. Для этого был разработан код Perl. В коде Perl радиус кривизны фронта детонации получается с помощью следующих шагов: сначала код Perl вызывает LS-PREPOST для вывода распределения давления в выбранный момент, затем код Perl идентифицирует элемент с са-

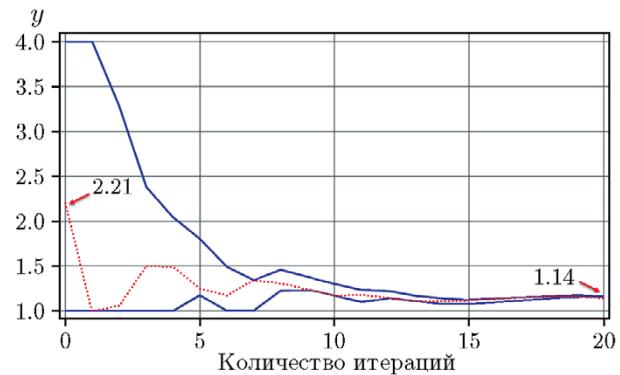


Рис. 4. Процесс оптимизации параметра y

мым высоким давлением в каждом столбце и извлекает координаты центра масс идентифицированных элементов. После этого подбираются коэффициенты уравнения (1) так, чтобы извлеченные координаты соответствовали этому уравнению в качестве профиля фронта детонации в выбранный момент. Значение радиуса кривизны R в вершине фронта детонации выводится в текстовый файл для чтения LS-OPT.

Чтобы рассчитать скорость детонации ВВ, в коде Perl определяется геометрическое место фронтов детонации в два разных момента времени и рассчитывается расстояние между вершинами этих двух фронтов. Затем, зная разницу во времени между фронтами, можно оценить скорость детонации D .

В качестве примера на рис. 4 показана история оптимизации параметра y в уравнении (5). Его значения установлены в диапазоне $y = 1 \div 4$ с начальным значением $y = 2.21$. После 20 итераций оптимизированное значение составило 1.14.

3. ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ЧИСЛЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

После 20 итераций в LS-OPT был определен набор значений неизвестных параметров. Они приведены в табл. 3.

В табл. 4 представлены значения скорости детонации и радиуса кривизны, полученные в экспериментах и численных расчетах, выполненных с найденными параметрами кинетики, а также расчетные значения максимального давления и максимальной температуры для зарядов различных диаметров. Видно, что при одинаковом диаметре заряда наблюдается некоторый разброс измеренных значений D_{exp} . Это может быть объяснено электриче-

Таблица 3
Параметры скорости реакции
алюминизированного (5 %) эмульсионного ВВ

Параметр	Значение	Параметр	Значение
I	$1.466 \cdot 10^6$	G_2	624.1
b	0.667	e	0.614
a	0.748	f	0.744
x	7.00	z	3.662
G_1	23.2	F_{mxig}	0.449
c	0.667	F_{mxgr}	0.938
d	0.333	F_{mng}	0.844
y	1.14		

скими всплесками на некоторых записях, разбросом значений истинной плотности ВВ (из-за использования разных партий) и неоднородностями в ВВ после загрузки в оболочку. Однако точный вклад указанных факторов неизвестен. Как правило, скорость детонации D увеличивается с увеличением диаметра заряда.

Определенные из экспериментов значения радиуса кривизны R_{exp} на оси симметрии имеют большую погрешность из-за чувствительности к ошибкам процедуры расчета этих значений по измеренным формам фронта. Оказалось, что средний радиус кривизны в случае заряда диаметром 40 мм немного больше, чем средний радиус кривизны в случае заряда диаметром 50 мм. Это может быть связано с по-

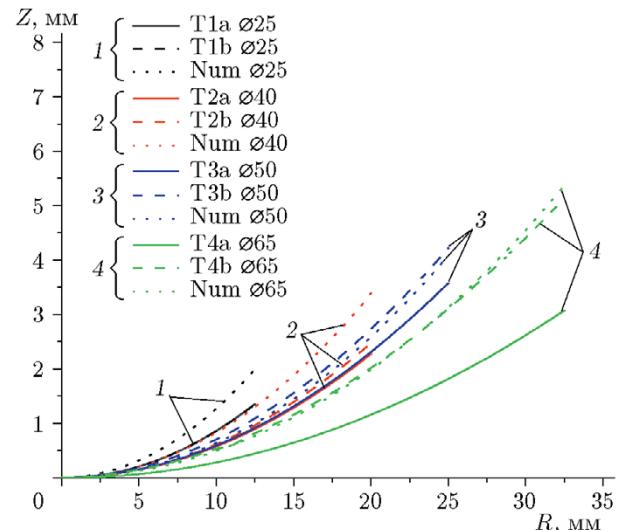


Рис. 5. Формы экспериментальных (Т) и рассчитанных (Num) детонационных фронтов

грешностями измерений.

Численные результаты показывают, что как скорость детонации, так и радиус кривизны детонационного фронта увеличиваются с ростом диаметра заряда. Рассчитанные значения D_{num} хорошо согласуются с измеренными. Полученные из численных расчетов радиусы кривизны R_{num} фронта детонации для каждого диаметра заряда имеют отклонение от измеренных величин.

Из табл. 4 видно, что при увеличении диаметра заряда от 25 до 65 мм максимальное давление повышается с 7.68 до 12.71 ГПа, что соответствует разумному диапазону давлений де-

Экспериментальные и численные результаты алюминизированного (5 %) эмульсионного ВВ

Диаметр заряда, мм	Номер теста	D_{exp} , м/с	R_{exp} , мм	D_{num} , м/с	R_{num} , мм	P_{max} , ГПа	T_{max} , К
25	T1a Ø25	4 212	54.6	4 106.1	39.7	7.68	1 549
	T1b Ø25	4 426	55.2				
40	T2a Ø40	4 801	87.4	4 779.8	57.0	10.63	1 977
	T2b Ø40	4 702	78.7				
50	T3a Ø50	4 788	73.7	4 960.0	84.9	12.16	2 199
	T3b Ø50	4 832	86.6				
65	T4a Ø65	4 862	166.2	5 086.5	109.6	12.71	2 267
	T4b Ø65	4 993	102.8				

Примечание. D_{exp} , D_{num} — измеренная и рассчитанная скорость детонации, R_{exp} , R_{num} — измеренный и рассчитанный радиус кривизны детонационного фронта, P_{max} и T_{max} — максимальные давление и температура в расчете.

тонации эмульсионных ВВ согласно экспериментальным результатам [8, 35]. Также видно, что максимальная температура увеличивается с 1 549 до 2 267 К при увеличении диаметра заряда с 25 до 65 мм. Результаты экспериментов [36] показали, что температура продуктов эмульсионных ВВ в широком диапазоне составляет $1\,880 \div 2\,370$ К. Численные результаты находятся в удовлетворительном качественном согласии с экспериментальными результатами. Изменение максимальных значений давления и температуры с увеличением диаметра заряда согласуется с теорией неидеальной детонации.

С использованием параметров кинетики, найденных в данной работе, рассчитаны профили детонационного фронта для зарядов различных диаметров. Рассчитанные и определенные из экспериментов профили детонационного фронта представлены на рис. 5. Видно, что формы фронтов, полученные в двух экспериментах с зарядами диаметром 25 мм, очень близки. В то же время измеренные формы фронтов других зарядов с одинаковым диаметром имеют различия. При малом диаметре заряда (25 и 40 мм) рассчитанные профили детонационных фронтов незначительно отличаются от экспериментальных профилей. При большом диаметре заряда (50 и 65 мм) рассчитанный профиль детонационного фронта располагается между двумя экспериментальными профилями.

ВЫВОДЫ

Проведена серия экспериментов для изучения влияния диаметра заряда на скорость детонации и форму фронта детонации с использованием алюминизированного эмульсионного взрывчатого вещества. Экспериментальные результаты показывают, что больший диаметр заряда приводит к более высоким скоростям детонации, при этом фронт детонации становится более пологим. На основе этих экспериментальных результатов разработана процедура, использующая пакет программного обеспечения LS-OPT для управления гидрокодом LS-DYNA с целью оптимизации параметров кинетической модели I&G. В этой процедуре в качестве целевой функции использовалась разница между рассчитанными значениями скорости детонации и радиуса кривизны детонационного фронта и измеренными в экспериментах с зарядами двух разных диаметров.

Для минимизации целевой функции использовался алгоритм аддитивной имитации отжига. Обнаружено, что рассчитанные скорости детонации и радиусы кривизны детонационных фронтов для зарядов двух диаметров с использованием установленных параметров кинетики хорошо согласуются с результатами измерений. Рассчитанные максимальные давления и температуры согласуются с имеющимися в литературе экспериментальными результатами. Сравнение расчетных скоростей детонации и радиусов кривизны детонационных фронтов с измеренными значениями для зарядов различных диаметров свидетельствует о правильности методики. Полученные значения давления и температуры дополнительно указывают на надежность найденных параметров.

Авторы благодарят Ганса Карлстрёма из LKAB Kimit AB за консультации по взрывчатым веществам.

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация — С. Yi и U. Nyberg; методология — С. Yi, U. Nyberg и D. Johansson; эксперименты — U. Nyberg и D. Johansson; программное обеспечение — С. Yi; написание — подготовка первоначального проекта С. Yi, U. Nyberg и D. Johansson; написание — обзор и редактирование С. Yi и С. R. San Miguel. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке: Project SLIM funded by the European Union's Horizon 2020 Research and Innovation Program (grant N 730294), Centre of Advanced Mining & Metallurgy at Luleå University of Technology and the Stakeholders of Swedish Blasting Research Centre.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kirby I. J., Leiper G. A. A small divergent detonation theory for intermolecular explosives // Proc. of the 8th Int. Symp. on Detonation, Albuquerque, NM, Naval Surface Weapons Center, White Oak, MD, 1985. — P. 176–186.

2. Braithwaite M., Farran T., Gladwell I., Lynch P. M., Minchinton A., Parker I. B., Thomas R. M. A detonation problem posed as a differential/algebraic boundary value problem // *Math. Eng. Ind.* — 1990. — V. 3, N 1. — P. 45–57.
3. Persson P., Holmberg R., Lee J. Rock Blasting and Explosives Engineering. — Florida: CRC Press, 1993.
4. Kennedy D. L. Multi-valued normal shock velocity versus curvature relationships for highly non-ideal explosives // Proc. of the 11th Int. Symp. on Detonation, Colorado, 1998.
5. Esen S. A statistical approach to predict the effect of confinement on the detonation velocity of commercial explosives // *Rock Mech. Rock Eng.* — 2004. — V. 37. — P. 317–330. — DOI: 10.1007/s00603-004-0026-3.
6. Howard W. M., Fried L. E., Souers P. C. Modeling of non-ideal aluminized explosives // 11th APS Topical Conf. on Shock Compression of Condensed Matter, Snowbird, UT, 1999.
7. Гогуля М. Ф., Махов М. Н., Долгобородов А. Ю., Бражников М. А., Архипов В. И., Щетинин В. Г. Механическая чувствительность и параметры детонации алюминизированных взрывчатых веществ // *Физика горения и взрыва*. — 2004. — Т. 40, № 4. — С. 82–95. — EDN: HRPDQV.
8. Юношев А. С., Бордзиловский С. А., Караканов С. М., Пластигин А. В. Влияние добавки алюминия на температуру детонации эмульсионного взрывчатого вещества // *Физика горения и взрыва*. — 2022. — Т. 58, № 5. — С. 125–134. — DOI: 10.15372/FGV20220515. — EDN: VFAXVO.
9. Kim B., Park J., Lee K.-C., Yoh J. J. A reactive flow model for heavily aluminized cyclotrimethylene-trinitramine // *J. Appl. Phys.* — 2014. — V. 116, N 2. — 023512. — DOI: 10.1063/1.4887811
10. Allum J. A study of the behavior of emulsion explosives: PhD Thesis / Cranfield Univ. — Cranfield, England, 2002.
11. Wood W. W., Kirkwood J. G. Diameter effect in condensed explosives. The relation between velocity and radius of curvature of the detonation wave // *J. Chem. Phys.* — 1954. — V. 22, N 11. — P. 1920–1924. — DOI: 10.1063/1.1739940.
12. Bdzil J. B. Steady-state two-dimensional detonation // *J. Fluid Mech.* — 1981. — V. 108. — P. 195–226. — DOI: 10.1017/S0022112081002085.
13. Esen S. A non-ideal detonation model for evaluating the performance of explosives in rock blasting // *Rock Mech. Rock Eng.* — 2008. — V. 41, N 3. — P. 467–497. — DOI: 10.1007/s00603-006-0119-2.
14. Hamashima H., Kato Y., Itoh S. Determination of JWL parameters for non-ideal explosive // AIP Conf. Proc. — 2004. — V. 706, N 1. — P. 331–334. — DOI: 10.1063/1.1780246.
15. Watt S. D., Sharpe G. J., Falle S., Braithwaite M. A streamline approach to two-dimensional steady non-ideal detonation: the straight streamline approximation // *J. Eng. Math.* — 2012. — V. 75. — P. 1–14. — DOI: 10.1007/s10665-011-9506-0.
16. Price M. A., Ghee A. H. Modeling for detonation and energy release from peroxides and non-ideal improvised explosives // *Centr. Eur. J. Energ. Mater.* — 2009. — V. 6, N 3–4. — P. 239–254.
17. LS-DYNA Keywords User's Manual. — Livermore Software Technol. Corp., 2019. — V. I.
18. Schimel B. D., Baker E. L., Grantham W. J. A method for parameter optimization of reactive flow continuum models by sequential quadratic programming // *J. Energ. Mater.* — 1997. — V. 15, N 4. — P. 289–311. — DOI: 10.1080/07370659708216089.
19. Gambino J., Tarver C., Springer H. K., White B., Fried L. Numerical parameter optimization of the ignition and growth model for HMX based plastic bonded explosives // AIP Conf. Proc. — 2018. — V. 1979, N 1. — 150015. — DOI: 10.1063/1.5044971.
20. Bergh M., Wedberg R., Lundgren J. Optimization of equation of state and burn model parameters for explosives // AIP Conf. Proc. — 2018. — V. 1979, N 1. — 100003. — DOI: 10.1063/1.5044875.
21. Cao T., Zhang L., Zhou X. Automatic calibration of Ignition and Growth model for a DNAN based melt-cast explosive // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. — 2018. — V. 397. — 012075. — DOI: 10.1088/1757-899X/397/1/012075.
22. Johansson D. Fragmentation and waste rock compaction in small-scale confined blasting: Licentiate thesis / Luleå Univ. of Technol. — Luleå, 2008.
23. Deng J. H., Nie S. L., Chen L. Determination of burning rate parameters for an emulsion explosive // Swedish Rock Eng. Res. — Stockholm: SveBeFo-Rep. 17, 1995.
24. Lee E. L., Tarver C. M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives // *Phys. Fluids*. — 1980. — V. 23, N 12. — P. 2362–2372. — DOI: 10.1063/1.862940.
25. Tarver C. M., Hallquist J. O., Erickson L. M. Modelling short pulse duration shock initiation of solid explosives // Proc. of the 8th Symp. on Detonation, Albuquerque, NM, 1985. — P. 951–960.
26. Tarver C. M., Kury J. W., Breithaupt R. D. Detonation waves in triaminotrinitrobenzene // *J. Appl. Phys.* — 1997. — V. 82, N 8. — P. 3771–3782. — DOI: 10.1063/1.365739.
27. Lee E. L., Horning H. C., Kury J. W. Adiabatic expansion of high explosives detonation products // TID4500-UCRL 50422. — Lawrence

- Livermore Nat. Lab., Univ. of California, Livermore, 1968.
- 28. **Esen S., Nyberg U., Arai H., Ouchterlony F.** Determination of the energetic characteristics of commercial explosives using the cylinder expansion test technique // Swebrec Rep. 2005:1. — Luleå Univ. of Technol., Stockholm, 2013.
 - 29. **Hansson H.** Determination of properties for emulsion explosives using cylinder expansion tests and numerical simulation // Swebrec Rep. 2009:1. — Luleå Univ. of Technol., Stockholm, 2009.
 - 30. **LS-DYNA** Keyword User's Manual. — Livermore Software Technol. Corp., 2019. — V. II: Material Models.
 - 31. **Tarver C. M., McGuire E. M.** Reactive flow modeling of the interaction of TATB detonation waves with inert materials // 12th Int. Detonation Symp., San Diego, California, 11–16 Aug., 2002.
 - 32. **Aldis D. F., Quirk W. J., Breithaupt R. D.** The effect of detonation curvature on cylindrical wall motion // Rep. UCRL-ID-107480, DE92 003110. — Lawrence Livermore Nat. Lab., 1991.
 - 33. **Riedel W., Thoma K., Hiermaier S., Schmolinske E.** Penetration of reinforced concrete by BETA-B-500, numerical analysis using a new macroscopic concrete model for hydrocodes // Proc. of the 9th Int. Symp. on Interaction of the Effects of Munitions with Structures, Berlin, 1999. — P. 315–322.
 - 34. **LS-OPT** User Manual. — Livermore Software Technol. Corp., 2018.
 - 35. **Юношев А. С., Бордзиловский С. А., Воронин М. С., Карабанов С. М., Макаров С. Н., Пластиинин А. В.** Детонационное давление эмульсионного взрывчатого вещества, сенсибилизированного полимерными микробаллонами // Физика горения и взрыва. — 2019. — Т. 55, № 4. — С. 60–68. — DOI: 10.15372/FGV20190408. — EDN: VHJSM.
 - 36. **Сильвестров В. В., Бордзиловский С. А., Карабанов С. М., Пластиинин А. В.** Температура детонационного фронта эмульсионного взрывчатого вещества // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 1. — С. 135–142. — EDN: TJHZKT.

Поступила в редакцию 22.03.2023.

После доработки 19.06.2023.

Принята к публикации 11.10.2023.