

РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

С. Кудзило, П. Кохличек*, В. А. Тржчинский, С. Земан*

Отдел взрывчатых веществ и физики взрыва, Военный технологический университет, Варшава, Польша, cudzilo@wul.wat.waw.pl

*Отделение теории и технологии взрывчатых веществ, Университет Пардубице, Пардубице, Чешская республика

Экспериментально и теоретически исследованы некоторые рабочие характеристики ряда эмульсионных взрывчатых веществ (ВВ) со стеклянными микросферами. Для каждого ВВ вычислена и определена экспериментально скорость детонации, и с каждым ВВ проведены опыты методами баллистического маятника и расширяющегося цилиндра. Полученные результаты позволили сравнить информативность обоих методов. Исследовано также влияние некоторых нитратов металлов, содержащихся в эмульсионной матрице, на детонационные характеристики и работоспособность ВВ.

Ключевые слова: взрывчатые вещества, стеклянные микросферы, нитраты металлов, детонационные характеристики, работоспособность взрывчатых веществ.

ВВЕДЕНИЕ

Эмульсионные взрывчатые вещества (ВВ) принадлежат к числу промышленных ВВ. Они появились в начале 60-х годов [1, 2] и получили достаточно широкое распространение благодаря относительно высоким детонационным параметрам и безопасности в обращении [3–6].

Эмульсионные ВВ готовили перемешиванием пересыщенного водного раствора некоторых окислителей с топливом с добавкой эмульгатора. Приготовленный таким образом состав чрезвычайно малочувствителен к инициированию, поэтому его сенсibiliзируют подходящими добавками (обычно это полимерные или стеклянные микросферы). В качестве основного окислителя эмульсионных ВВ применяют нитрат аммония (AN), а нитраты натрия и кальция часто добавляют, чтобы изменить свойства раствора окислителя. Топливная фаза представляет собой различные минеральные масла, парафины и (в некоторых случаях) полимерные вещества.

Отличительная особенность эмульсионных ВВ состоит в том, что окислитель находится в водном растворе в виде мелких капель, покрытых очень тонким слоем топлива. Следовательно, в этом случае очень велика межфазная поверхность, благодаря чему ход детонационного процесса почти идеален в отличие от других композитных топлив на основе нитрата аммония. Это находит свое отражение, на-

пример, в том, что экспериментальные значения детонационных параметров эмульсионных ВВ, измеренные на зарядах большого диаметра, почти совпадают с теоретическими, полученными в предположении полного разложения нитрата аммония на детонационном фронте.

В настоящей работе исследованы детонационные и рабочие характеристики пяти эмульсионных ВВ со стеклянными микросферами. Для приготовления эмульсионной матрицы использовались водные растворы чистого нитрата аммония либо его смеси с нитратами натрия, кальция, никеля и кобальта. Содержание других компонентов было незначительно, чтобы поддержать постоянство кислородного баланса в диапазоне $\pm 2\%$. Для каждого ВВ была измерена и рассчитана скорость детонации, а также проведены эксперименты с использованием методов баллистического маятника и «тест-цилиндра». Полученные результаты позволили сравнить эффективность обоих методов для определения рабочих характеристик ВВ. Они были также использованы для анализа влияния нитратов металлов на работоспособность эмульсионных ВВ и выбора составов, обладающих наилучшими детонационными и рабочими характеристиками.

1. ИССЛЕДУЕМЫЕ ВВ

Составы эмульсионных матриц приведены в табл. 1. Эмульсии готовили с использовани-

Таблица 1

Состав эмульсионных ВВ

ВВ	Массовое содержание компонентов, %								
	NH ₄ NO ₃ (AN)	H ₂ O	Эмуль- гатор	Мине- ральное масло	Полибу- тадиен	Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O (CaN)	Ni(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O (NiN)	Co(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O (CoN)	NaNO ₃ (NaN)
AN*	84,0	10,0	1,9	3,6	0,5	—	—	—	—
AN**	82,0	12,0	2,2	3,3	0,5	—	—	—	—
AN-CaN	65,6	13,0	2,0	3,6	0,8	15,0	—	—	—
AN-NiN	67,3	12,0	2,0	3,4	0,3	—	15,0	—	—
AN-CoN	67,3	12,0	2,0	3,4	0,3	—	—	15,0	—
AN-NaN	65,7	13,0	2,0	3,6	0,7	—	—	—	15,0

Примечание. Здесь и далее AN* — состав, использованный только в экспериментах с баллистическим маятником; AN** — состав, использованный только в опытах по методу «тест-цилиндра».

ем простейшей аппаратуры, состоящей из термостата и сосуда, оснащенного мешалкой. Раствор окислителей нагревался до температуры 120 °С и затем медленно добавлялся в сосуд, в котором перемешивалась (скорость мешалки 900 об/мин) подогретая до 95 °С смесь топлива (масло и полибутадиен) с эмульгатором. После добавления всего количества окислителя перемешивание продолжалось еще приблизительно две минуты, чтобы получить мелкие частицы эмульсии.

Окончательно взрывчатые смеси готовили путем смешивания эмульсионных матриц со стеклянными микросферами (производство фирмы «ЗМ», средний размер ≈ 80 мкм). Перемешивание проводили тщательно (с использованием той же мешалки, но при меньшей скорости) до тех пор, пока не добивались равномерного распределения микросфер в эмульсионной матрице. Во всех опытах массовая доля микросфер составляла 3 % (сверх 100 %). Начальная плотность ВВ определялась по массе и объему образца в пластиковых или медных трубках, которые использовались при измерениях скорости детонации, а также в опытах по методу «тест-цилиндра».

2. ОПЫТЫ С БАЛЛИСТИЧЕСКИМ МАЯТНИКОМ

Измерения относительной работоспособности ВВ проводились в соответствии с процедурой, описанной в [7]. Образцы массой 10 г помещались в тонкие трубки диаметром 24 мм и инициировались с помощью капсюля во взрывной камере (стволе орудия) объемом 283 см³.

В экспериментах определялось отклонение баллистического маятника, значение которого (по калибровочной кривой) использовалось для нахождения относительной работоспособности, определяемой как отношение массы взрывающегося заряда исследуемого ВВ к массе динамита, вызывающего такое же отклонение маятника. Полученные таким методом значения относительной работоспособности приведены в табл. 2, где указаны также экспериментальные значения плотности ВВ (ρ_0), и скорости детонации (D_{exp}) и некоторые расчетные характеристики ВВ (D_{ideal} — идеальная скорость детонации, $[AN]_{inert}$ — доля нитрата аммония, оставшаяся инертной в волне детонации, n_g — количество молей газообразных продуктов детонации).

Скорость детонации измерялась ионизационными датчиками. Заряды ВВ помещались в пластиковые трубки с внутренним диаметром 32 мм и длиной 250 мм. В каждом заряде было три измерительных базы длиной 50 мм, первый датчик размещался на расстоянии 90 мм от промежуточного заряда. Эти значения были достаточно большими, чтобы обеспечить режим стационарной детонации и определить ее скорость с точностью ≈ 1 %.

Теоретические расчеты параметров детонации (D_{ideal} , $[AN]_{inert}$, n_g) были выполнены с использованием термодинамической программы СНЕЕТАН [8] с коэффициентами уравнения состояния ВКВ, рекомендованными в [9]: $\alpha = 0,5$, $\beta = 0,298$, $\varepsilon = 10,5$, $\theta = 6620$. Эти значения были приняты на основе обширной базы данных о свойствах продуктов детона-

Таблица 2
Характеристики ВВ в опытах с баллистическим маятником

ВВ	Относительная работоспособность, %	ρ_0 , кг/м ³	D_{exp} , м/с	D_{ideal} , м/с	$[AN]_{inert}$, %	n_g , моль/кг
AN*	74	1051	5100	5924	25,8	34,43
AN-CaN	73	1073	4800	5716	33,2	31,78
AN-NiN	65	1109	4410	5712	47,5	28,32
AN-CoN	72	1063	4560	5559	36,8	31,24
AN-NaN	67	1077	4740	5575	36,6	29,04

ции и об измеренных параметрах в плоскости Чемпена — Жуге, приведенных в [9]. Подтверждением достоверности определения количества непрореагировавшего в детонационной волне нитрата аммония является совпадение экспериментальных и теоретических значений скорости детонации.

Из анализа данных табл. 2 следует, что смесь, содержащая в своем составе в качестве окислителя только AN, обладает наивысшей работоспособностью и ей соответствуют наибольшие значения параметров детонации. Частичная замена нитрата аммония нитратом никеля (AN-NiN) или нитратом натрия (AN-NaN) существенно снижает работоспособность ВВ. Это можно объяснить тем, что эти ВВ генерируют меньшее количество газообразных продуктов детонации.

Данные рис. 1 показывают, к каким изменениям работоспособности ВВ и значений параметров детонации приводит введение нитратов металлов в эмульсионную матрицу. Из представленных здесь результатов следует, что при использовании нитрата кальция (AN-CaN) в качестве дополнительного окислителя рассматриваемые параметры меняются в наименьшей степени, в то время как введение в смесь нитрата натрия (AN-NaN) дает ВВ с относительно высокими параметрами детонации и низкой работоспособностью. Отсутствие корреляции между относительной работоспособностью и параметром $\rho_0 D^2$ указывает на существование других факторов, влияющих на эти характеристики. Одним из них может быть то, что относительная работоспособность и скорость детонации измерялись для разных образцов и в совершенно различных условиях. Поэтому проводились эксперименты в режиме «тест-цилиндра», чтобы определить работоспособность ВВ, используя некоторые энерге-

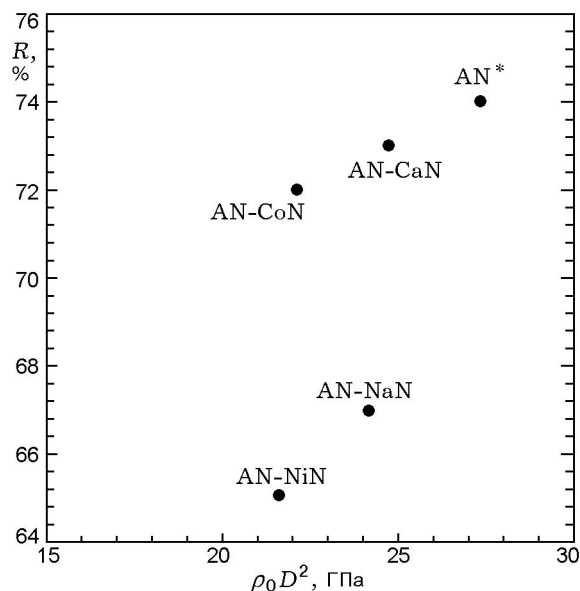


Рис. 1. Зависимость относительной работоспособности (R) от параметра $\rho_0 D^2$

гические параметры, получаемые в ходе этих опытов [10].

3. МЕТОД «ТЕСТ-ЦИЛИНДРА»

Суть метода «тест-цилиндра» состоит в регистрации выбранной стадии процесса ускорения оболочки, приводимой в движение расширяющимися продуктами детонации, распространяющимися вдоль внутренней поверхности оболочки (медной трубки). Расширение продуктов детонации можно зафиксировать методами, используемыми для измерения быстропротекающих процессов, такими как щелевая фоторазвертка, лазерная интерферометрия или импульсная рентгеновская съемка. Результаты регистрации процесса ускоре-

Таблица 3
Экспериментальные и расчетные характеристики ВВ,
использованных в опытах по методу «тест-цилиндра»

ВВ	ρ_0 , кг/м ³	D_{exp} , м/с	D_{ideal} , м/с	$[AN]_{inert}$, %	n_g , моль/кг
AN**	1062	5460	5973	17,0	37,47
AN-CaN	1065	5095	5680	22,5	34,78
AN-NiN	1146	5240	5872	29,3	33,54
AN-CoN	1093	5200	5687	21,4	35,58
AN-NaN	1079	5040	5584	27,0	31,62

ния обычно используют при составлении полуэмпирического уравнения состояния продуктов детонации [11–14]. Кроме того, данные этих опытов могут быть использованы для определения других важных характеристик ВВ. Например, на основе зависимости радиального перемещения внешней стенки трубки от продольной координаты можно определить скорость расширения оболочки и затем энергию Гарни и энергию детонации исследуемого ВВ [15, 16].

В настоящей работе метод «тест-цилиндра» применяли для получения количественных значений некоторых энергетических параметров эмульсионных ВВ. Результаты этих экспериментов и некоторые расчетные величины представлены в табл. 3. Здесь значения D_{exp} существенно выше, чем в табл. 2. Это свидетельствует о том, что в опытах по методу «тест-цилиндра» в детонационной волне реагирует большая доля нитрата аммония. Поэтому наблюдается лучшее согласование измеренного и теоретического значений скорости детонации. Сопоставление данных табл. 2 и 3 показывает, что прочность оболочки заряда сильно влияет на параметры детонации, что отражается в неидеальности свойств детонации.

Одна заметная особенность величины n_g состоит в том, что составы с нитратами натрия и никеля в опытах по методу «тест-цилиндра» дают меньшее количество газообразных продуктов детонации. Однако различие между ними и другими ВВ не такое большое, как в опытах с баллистическим маятником (см. табл. 2).

Для регистрации расширения медной трубки продуктами детонации использовалась рентгеновская установка SCANDIFLASH [10, 13]. Медная трубка, наполненная исследу-

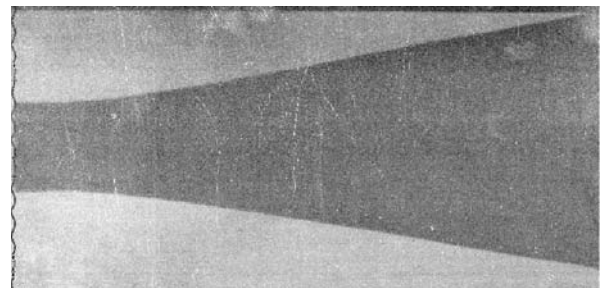


Рис. 2. Рентгенограмма медной трубки, расширяющейся под действием продуктов детонации состава AN**

емым ВВ, располагалась на расстоянии 2,7 м от источника излучения и на расстоянии 0,5 м от регистрирующей пленки. Заряд размещался вертикально, при этом линия, соединяющая источник излучения и пленку, была перпендикулярна оси заряда. Длина медных трубок 300 мм, внутренний диаметр 25 мм, толщина стенок 2,5 мм. Датчик, запускающий импульс рентгеновской установки, располагался на расстоянии 20 мм от конца заряда. Это позволяло наблюдать непрерывный процесс расширения продуктов детонации в течение ≈ 40 мкс до того момента, когда волна детонации достигала сечения заряда, где находился датчик.

Пример рентгенограммы медной трубки, расширяющейся под действием продуктов детонации состава AN**, используемого только в опытах по методу «тест-цилиндра», приведен на рис. 2. По фотографии с использованием компьютерной обработки определялась зависимость внешнего радиуса трубы от аксиальной координаты. Анализируемый диапазон изменения аксиальной координаты был ограничен величиной, при которой объем продуктов дето-

нации в 9–10 раз превышал начальный объем. Эта зависимость вместе с данными о скорости детонации (см. табл. 3) использовалась для определения работоспособности ВВ.

3.1. Ускоряющая способность продуктов детонации — энергия Гарни

Одним из параметров, с помощью которого можно характеризовать работоспособность ВВ, является ускоряющая способность продуктов детонации. В работе [17] предложено вычислять этот параметр с использованием скорости стенки медной трубки в условиях «тест-цилиндра» при относительном увеличении объема в 2,2, 4,1 и 6,5 раза. Ускоряющая способность может быть выражена также в виде энергии Гарни E_G , которая представляет собой сумму кинетической энергии лайнера и продуктов детонации [18]. В случае цилиндрического лайнера энергия Гарни выражается уравнением

$$E_G = \left(\mu + \frac{1}{2}\right) \frac{u_L^2}{2}, \quad (1)$$

где μ — отношение массы трубки к массе ВВ, u_L — результирующая скорость трубки.

Обычно в литературе приводятся конечные значения энергии Гарни или скорости Гарни, равной корню квадратному из удвоенной энергии Гарни. Параметры соответствуют скорости трубки с радиусом, при котором еще сохраняется сплошность материала трубки [18]. В работе [15] было показано, что оценку ускоряющей способности ВВ можно получить, используя зависимость энергии Гарни (определяемой соотношением (1)) от относительного объема расширяющихся продуктов детонации. Из уравнения (1) следует, что для нахождения этой зависимости необходимо знать скорость трубки (u_L), движущейся под воздействием продуктов детонации.

Детальное описание процедуры определения скорости трубки с использованием зарегистрированной в методе «тест-цилиндра» зависимости положения внешней поверхности трубки от координаты вдоль оси приведено в работе [15]. Вначале определялось положение средней цилиндрической поверхности (r_m). В предположении несжимаемости материала трубки значение r_m можно найти из соотношения

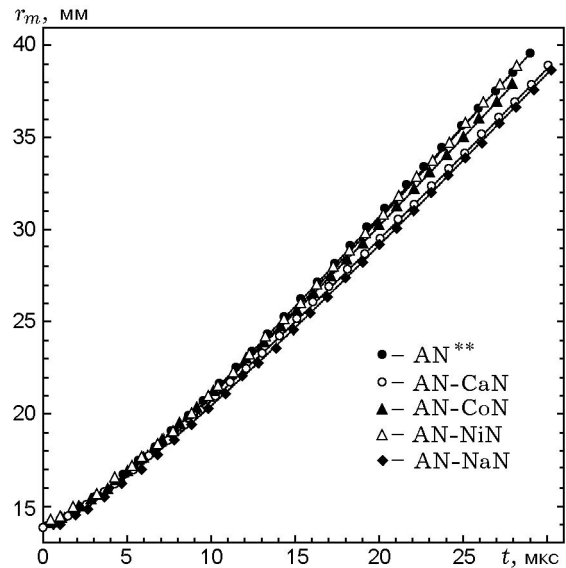


Рис. 3. Зависимость радиального смещения средней поверхности трубки от времени:

точки — эксперимент, линии — уравнение (3)

$$r_m = \sqrt{r_e^2 - \frac{1}{2}(r_{e,0}^2 - r_{i,0}^2)}, \quad (2)$$

где $r_{e,0}$ и $r_{i,0}$ — начальные значения радиусов внешней и внутренней поверхностей; r_e и r_m — текущие радиусы наружной и средней поверхностей трубки на данном расстоянии x .

Предполагая движение продуктов детонации и трубки стационарным (т. е. $x = Dt$, где D — скорость детонации, t — время), можно заменить зависимость $r_m(x)$ зависимостью $r_m(t)$. Положение центральной поверхности трубки во времени аппроксимировано в [15] выражением

$$r_m = r_{m,0} + \sum_i a_i \{b_i(t - t_0) - [1 - \exp(-b_i(t - t_0))]\}, \quad (3)$$

где $r_{m,0}$ — начальное значение r_m ; a_i , b_i , t_0 — параметры. Полученная таким образом зависимость $r_m(t)$ представлена на рис. 3.

Имея зависимость $r_m(t)$, можно вычислить, дифференцируя уравнение (3), радиальную скорость трубки

$$u_m \equiv \frac{dr_m}{dt} = \sum_i a_i b_i [1 - \exp(-b_i(t - t_0))], \quad (4)$$

а затем результирующую скорость

$$u_L = 2D \sin \frac{\Theta}{2}, \quad \Theta = \arctg \frac{u_m}{D}. \quad (5)$$

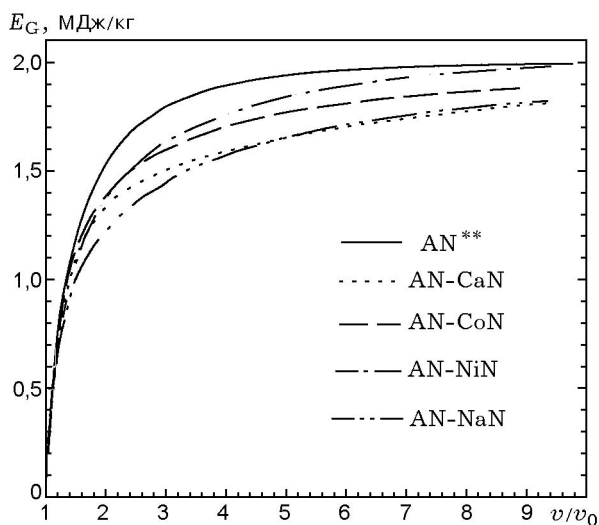


Рис. 4. Зависимость энергии Гарни от относительного объема продуктов детонации

Используя уравнения (4), (5) и измеренные значения скоростей детонации (см. табл. 3), определяли значения u_L , а затем по уравнению (1) вычисляли значение E_G . Результаты вычислений в виде зависимости энергии Гарни от относительного объема продуктов детонации (v/v_0) представлены на рис. 4.

Из анализа кривых на рис. 4 следует, что при $v/v_0 > 6$ значение энергии Гарни состава AN** практически не возрастает, что характерно для сильных ВВ. Таким образом, значения E_G для эмульсионных ВВ, содержащих только нитрат аммония, близки к идеальным. В случае, когда ВВ содержат нитраты металлов, наблюдается медленное, но непрерывное увеличение энергии Гарни даже при $v/v_0 > 6$. Это показывает, что у них замедляется скорость выделения энергии за детонационным фронтом. При этом добавки нитратов никеля и натрия вызывают наибольшее снижение детонационных свойств состава AN**.

На рис. 5 показана зависимость $E_G(\rho_0 D^2)$. При $v/v_0 = 2,5$ она близка к приведенной на рис. 1, а при $v/v_0 = 9$ данные для всех ВВ лежат почти на одной линии. Это означает, что существует линейная зависимость между работоспособностью ВВ и параметрами детонации.

Данные рис. 4 и 5 показывают также, что в зарядах с прочной оболочкой химические реакции в расширяющихся продуктах детонации происходят в течение длительного периода времени и высвобождающаяся дополнитель-

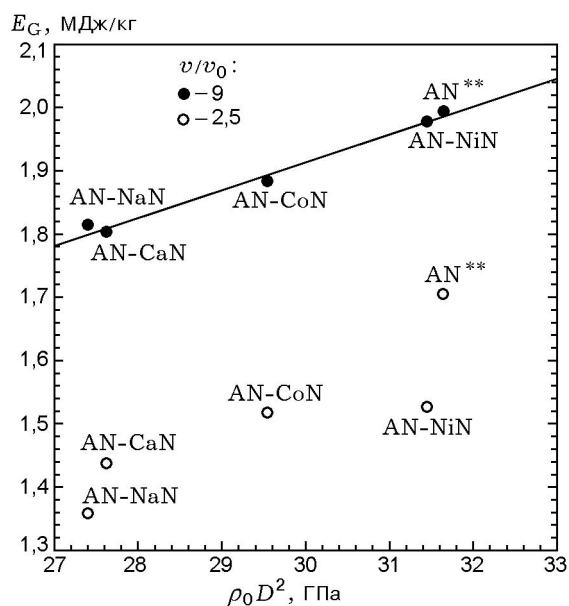


Рис. 5. Зависимость энергии Гарни от параметра $\rho_0 D^2$

ная энергия превращается в работу расширения продуктов детонации.

3.2. Работа расширения продуктов детонации

В литературе (см., например, [19, 20]) работу расширения продуктов детонации w определяют как работу продуктов, расширяющихся от объема в точке Чепмена — Жуטה (v_{CJ}) до объема v за вычетом энергии сжатия ВВ:

$$w(v) = -e_c + \int_{v_{CJ}}^v p dv. \quad (6)$$

Для вычисления работы расширения необходимо знать изоэнтропу расширения продуктов детонации. Одной из простейших форм изоэнтроп является адиабата Пуассона

$$p = p_{CJ} \left(\frac{v_{CJ}}{v} \right)^\gamma, \quad (7)$$

где γ — показатель адиабаты. Чтобы определить константы в уравнении (7), необходимо знать значения двух параметров детонации. Первый из них — это обычно экспериментальная скорость детонации, второй — показатель адиабаты продуктов детонации. Наиболее часто используется так называемый эффективный показатель изоэнтропы, который определяется

Таблица 4
Эффективный показатель адиабаты Пуассона

ВВ	γ
AN**	2,86
AN-CaN	2,85
AN-NiN	2,80
AN-CoN	2,84
AN-NaN	2,83

не по параметрам в точке Чепмена — Жуге, а на основе реальной изоэнтропы в некотором диапазоне изменения объема продуктов детонации. В соответствии с процедурой, предложенной в работах [13, 21], его значение можно определить по результатам экспериментов, выполненных в режиме «тест-цилиндра». В этом методе экспериментальный профиль медной трубки сравнивается с полученным при численном моделировании процесса расширения. Состояние продуктов детонации описывается адиабатой Пуассона (7). В результате выбирается значение γ , обеспечивающее наилучшее согласование расчетного и экспериментального профилей трубки. Значение эффективного показателя изоэнтропы продуктов детонации для исследованных ВВ приведены в табл. 4.

После проведения интегрирования в уравнении (6) с учетом соотношения (7) получим следующее выражение для работы расширения:

$$w = \frac{p_{CJ} v_{CJ}}{\gamma - 1} \left[\frac{\gamma + 1}{2\gamma} - \left(\frac{v_{CJ}}{v} \right)^{\gamma - 1} \right]. \quad (8)$$

Зависимость работы расширения, вычисленной по соотношению (8), от относительного объема продуктов детонации показана на рис. 6. Здесь же указан интервал изменения объема продуктов детонации, соответствующий диапазону давлений при разрушении горных пород [22]. Как только горная порода начинает разрушаться, образуются трещины, в которые проникают продукты детонации, ослабляя тем самым разрушающую способность ВВ. Поэтому можно предполагать, что значения расширения при $v/v_0 = 10, 15$ и 20 могут быть использованы для сравнения эффективности взрыва в прочной, сильной и слабой горной породе [22].

Как и ожидалось, состав, содержащий

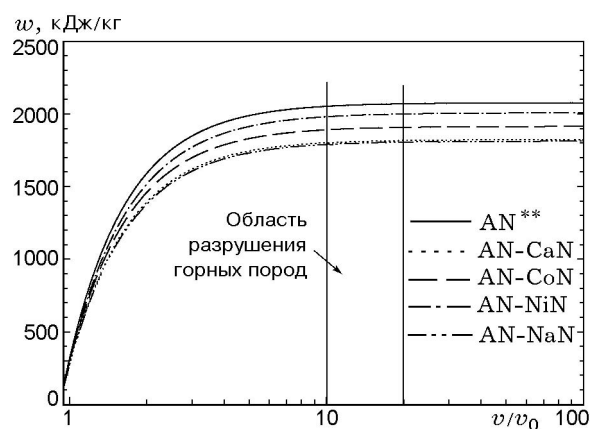


Рис. 6. Работа расширения продуктов детонации, вычисленная с использованием адиабаты Пуассона

только нитрат аммония, производит наибольшую работу расширения (среди исследованных ВВ). Этот результат получен с использованием обоих экспериментальных методов. Однако для других ВВ наблюдается некоторое разногласие в результатах, полученных разными методами. Трудно достоверно определить, какой из них более точен, тем более что различие сравнительно невелико. Однако принимая во внимание, что масса образцов была больше в опытах, выполненных по методу «тест-цилиндра», и длительность процесса расширения в этом случае также была значительно больше, представляется, что данные этих опытов более точны при сравнении разрушающей способности ВВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных экспериментов показали, что метод «тест-цилиндра» может быть успешно применен для количественного определения эффективности ВВ. Рентгенограммы процесса движения стенки медной трубки позволяют относительно просто определить энергию Гарни, а результаты этих экспериментов совместно с данными численного моделирования процесса дают возможность получить уравнение состояния продуктов детонации и, следовательно, оценить их эффективную работу расширения.

Добавление нитратов металлов в эмульсионный состав ухудшает детонационные свойства ВВ, содержащего только нитрат аммония, что отражается в уменьшении как параметров

детонации, так и работоспособности. Уменьшение работоспособности наиболее существенно на начальной стадии расширения продуктов детонации. По мере увеличения объема продуктов детонации эти расхождения уменьшаются. Это означает, что химические реакции идут также и в расширяющихся продуктах детонации и дополнительная энергия, выделившаяся в этих реакциях, преобразуется в механическую работу. По этой причине параметры детонации и характеристики работоспособности, определенные на начальной стадии процесса расширения, сильно зависят от диаметра заряда и типа оболочки. В связи с этим наиболее реалистичные значения работоспособности можно получить, пользуясь методом «тест-цилиндра», а не в опытах с баллистическим маятником.

Авторы выражают благодарность Jiri Tesitel (The Research Institute of Industrial Chemistry, Pardubice, Czech Republic) за помощь в проведении ряда экспериментов и проф. Andrzej Maranda (Military University of Technology, Warsaw, Poland) за многочисленные дискуссии и полезные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Egly R. S., Neckar A. E. Water resistant sensitizers for blasting agents // US Patent 3,161,551. 1964.
2. Gehrig N. E. Aqueous emulsified ammonium nitrate blasting compositions containing nitric acid // US Patent 3,164,503. 1965.
3. Yoshida M., Iida M., Tanaka K., et al. Detonation behaviour of emulsion explosives containing glass micro-balloons // 8th Symp. (Intern.) on detonation, Albuquerque, NM, July 15–19, 1985. P. 993–1000.
4. Lee J., Persson P. A. Detonation behaviour of emulsion explosives // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 1990. V. 15, N 5.
5. Chaudhri M. M., Almgren L. A. Detonation behaviour of «water-in-oil» type emulsion explosive containing glass micro-balloons of selected sizes // 10th Intern. Detonation Symp., Boston, Massachusetts, July 12–16, 1993. P. 741–748.
6. Takahashi K., Murata M., Kato Y., et al. Non-ideal detonation of emulsion explosives // J. Mater. Proces. Technol. 1999. V. 85. P. 52–55.
7. Kohler J., Meyer R. Explosives. Weinheim, Germany: VCH Publ., 1993. P. 24–25.
8. Fried L. E. CHEETAH 1.39 — User's manual // Report UCRL-MA-117541. 1996.
9. Hobbs M. L., Baer M. R. Calibrating the BKW-EOS with a large product species base and measured C-J properties // 10th Intern. Detonation Symp., Boston, Massachusetts, July 12–16, 1993. P. 409–418.
10. Cudzilo S., Trzcinski W. A. Application of a cylinder test for determining some characteristics of explosives, (in Polish) // Biuletyn WAT. 1997. V. 46, N 5.
11. Hornberg H. Determination of fume state parameters from expansion measurements of metal tube // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 1986. V. 11, N 1. P. 23–31.
12. Fried L. E., Souers P. C. BKWC: an empirical BKW parametrization based on cylinder test data // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 1996. V. 21. P. 215–221.
13. Cudzilo S., Trebinski R., Trzcinski W. Determination of the effective exponent of isentrope for the detonation products of high explosives // Chem. Phys. Reports. 1997. V. 16. P. 1719–1732.
14. Trebinski R., Trzcinski W. A. Determination of an expansion isentrope for detonation products of condensed explosives // J. Techn. Phys. 1999. V. 40, N 4. P. 447–504.
15. Trzcinski W. A. Application of a cylinder test for determining energetic characteristics of explosives // J. Techn. Phys. 2001. V. 42, N 2. P. 165–179.
16. Cudzilo S., Trzcinski W. A. The application of the cylinder test to determine the energy characteristics of industrial explosives // Arch. of Mining Sci. 2001. V. 46, N 3. P. 291–307.
17. Souers P. C., Kury J. W. Comparison of cylinder data and code calculations for homogeneous explosives // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 1993. V. 18. P. 175–181.
18. Walters W. P., Zukas J. A. Fundamentals of Shaped Charges. New York: A Wiley-Interscience Publ., 1989.
19. Jacobs S. J. Energy of Detonation, United States Naval Ordnance Laboratory // Report NAVORD — 4366. 1956.
20. Fickett W., Davis W. C. Detonation. Berkeley: Univ. of California Press, 1979.
21. Trebinski R., Trzcinski W. Method of determination of the effective exponent of isentrope for the detonation products of condensed explosives, (in Polish) // Biuletyn WAT. 1996. V. 45, N 3.
22. Person P. A., Chiappetta R. F. Shock Waves and Detonation, Explosive Performance // Proc. NIXT'94. Pretoria, RSA, 1994.