

О РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

А. Н. Афанасенков, Л. И. Котова, Б. Н. Кукиб

Институт проблем химической физики РАН, 142432 Черноголовка

Определена работоспособность смесей аммонита 6ЖВ с различными добавками и смесей аммиачной селитры с алюминием различного состава. С использованием полученных результатов и известных литературных данных получена формула для расчета относительной работоспособности промышленных взрывчатых веществ, содержащая два параметра — теплоту взрыва и объем продуктов взрыва. Установлено, что работоспособность смесей селитры с алюминием (при мощном инициировании, вызывающем в смесях пересжатый режим детонации) превышает работоспособность эталонного взрывчатого вещества (аммонита 6ЖВ) при содержании алюминия $10 \div 40$ %, при этом максимум работоспособности наблюдается для смеси, содержащей 30 % алюминия. Результаты эксперимента и расчета по предложенной формуле удовлетворительно согласуются между собой.

ВВЕДЕНИЕ

При совершении работы в виде общего действия взрыва (разрушение значительных объемов горных пород, выброс грунта) основным параметром взрывчатого вещества (ВВ) принято считать полную работу взрыва (A), или работоспособность. Определение работоспособности ВВ было дано А. Ф. Беляевым [1]: «Полной работой взрыва или полной работоспособностью мы будем называть сумму всех форм механической работы взрыва». Для расчета полной работы взрыва обычно используют формулы

$$A = Q \left[1 - \left(\frac{V_{in}}{V_f} \right)^{n-1} \right] \quad (1)$$

или

$$A = Q \left[1 - \left(\frac{p_f}{p_{in}} \right)^{(n-1)/n} \right],$$

где V_{in} , V_f — начальный и конечный объемы продуктов взрыва; n — показатель политропы; p_{in} — начальное давление продуктов взрыва; p_f — конечное давление продуктов взрыва, когда они, расширившись, совершили полную работу A ; Q — теплота взрыва.

Полная работа взрыва максимальна при расширении продуктов взрыва в воздух. В этом случае $p_f = p_0$ и $V_f = V_0$, где p_0 — атмосферное давление, V_0 — объем продуктов взрыва при нормальных условиях. Работоспособность ВВ в заданной породе определяется тремя параметрами: Q , n и p_f или V_f (давление зависит от прочности породы). Поскольку аб-

солютное значение работы взрыва определить трудно, так как отсутствуют данные по p_f , полную работу взрыва рассчитывали по формуле (1), используя табличные или рассчитанные по хорошо известным методам [1–4] значения Q и V_0 и постоянное для всех ВВ значение $n = 1,25$. Такая величина получила название «идеальной работы взрыва» (A_{id}), вошла в справочную литературу [4] и стала служить характеристикой работоспособности ВВ (A_{id} обязательно включается в технические условия на ВВ).

Оказалось, что всегда $A_{id} < Q$ и различие может достигать $20 \div 25$ %. Поэтому в [5] было предложено реальную адиабату расширения продуктов взрыва заменить двумя. Первая — адиабата продуктов взрыва, выходящая из точки Жуге (показатель политропы равен его значению в точке Жуге); вторая — адиабата воздуха с показателем политропы $n = 1,4$. Точка их сопряжения соответствует давлению $\approx 0,25$ ГПа. С использованием этого предложения расчет полной работы взрыва дает значение, практически равное теплоте взрыва. Например, для аммонита 6ЖВ в ТУ и в [4] приведены значения $A_{id} = 850$ ккал/кг и $Q = 1031$ ккал/кг, различие 18%. Расчет же по составной изоэнтропе дает значение 1010 ккал/кг, различие всего 2 %. Это означает, что работоспособность ВВ можно характеризовать его теплотой взрыва. В результате получаем «энергетическое» определение работоспособности. Его придерживались многие

специалисты взрывного дела: К. К. Андреев, А. Ф. Беляев, Л. В. Дубнов, Г. П. Демидюк, В. А. Асонов, Б. Д. Росси и др.

Понятие работоспособности как работы, совершаемой расширяющимися продуктами взрыва, никем не оспаривалось, но тем не менее вводились новые понятия. Например, эффективность взрыва ВВ, которую определяли как «способность взрывчатого вещества производить в больших объемах полезные формы работы» [2]. В одних случаях это понятие выступало как синоним работоспособности, в других — как самостоятельное понятие, фактически ничего не выражающее. Например, в [6] отмечается, что в известных методах оценки работоспособности ВВ (бомба Трауцля, баллистическая мортира и др.) измеряют часть работоспособности и по ней определяют сравнительную работоспособность ВВ, которая во многих случаях не соответствует «практической эффективности» ВВ. Для определения «практической эффективности» предлагается метод воронкообразования (взрыв в песке или горной породе). В работе [7] прямо указано, что понятие «эффективность взрыва» не имеет физического смысла, поскольку в него входит термин «полезная форма работы», которая не может быть определена по законам термодинамики.

Один и тот же механический эффект взрыва можно считать полезной формой работы, если он соответствует цели, с которой проводится взрыв, и бесполезной, если не соответствует цели. Например, разлет породы нежелателен при взрывном дроблении породы, но является целью взрывов на выброс.

Еще больше запутали этот вопрос авторы работы [8]. Не определяя понятие «эффективность ВВ», они ввели новое понятие — «универсальный термодинамический критерий эффективности ВВ». За критерий эффективности ВВ они приняли полную работу взрыва в форме (1), где конечный объем продуктов взрыва заменен текущим, т. е. критерий не является постоянной величиной, а зависит от степени расширения продуктов взрыва. Для характеристики ВВ авторы [8] предлагают пользоваться относительной эффективностью (для заданной степени расширения) — отношением критериев эффективности исследуемого и эталонного ВВ. В [8] также отмечается, что критерий эффективности ВВ характеризует собственно метательную способность ВВ, а работоспособность ВВ составляет только часть критерия.

Применение алюминизированных ВВ и предохранительных ВВ с ионнообменными солями показало, что реальная работоспособность не соответствует расчетной по теплоте взрыва. В то же время, как известно из практики взрывных работ, конечные значения давления (объема) продуктов взрыва зависят от свойств среды, в которой производят взрыв, и полная работа взрыва для данного ВВ не является величиной постоянной. Поэтому для количественного сравнения действия взрыва разных ВВ широкое распространение получило понятие относительной работоспособности ВВ (f). Оказалось, при взрыве ВВ в одинаковых условиях величина f не зависит от прочности горной породы [7]. У ВВ, сбалансированных на CO_2 (нулевой кислородный баланс), продукты взрыва имеют практически одинаковый состав, т. е. одинаковый показатель n . Тогда единственной характеристикой ВВ становится теплота его взрыва ($A \sim Q$). Исходя из этого условия величина f определяется как отношение работы, совершенной зарядом ВВ заданной массы (A), к работе, совершенной зарядом эталонного ВВ той же массы (A_{ref}) в таких же условиях: $f = A/A_{ref}$ или $f = Q/Q_{ref}$, где Q_{ref} — удельная теплота взрыва эталонного ВВ.

Часто используют и параметр, называемый переводным коэффициентом K . Если взрывают заряды сравниваемых ВВ разной массы, но такие, что получают одинаковую работу взрыва для обоих ВВ, то $A = QM = Q_{ref}M_{ref}$ и $K = M/M_{ref} = Q_{ref}/Q = 1/f$, где M и M_{ref} — массы зарядов сравниваемого и эталонного ВВ. Параметр K для ВВ, применяемых в промышленности, приведен, например, в [9, 10]. Величина M_{ref} получила название массы эквивалентного заряда. Следует отметить, что в экспериментальных методах определения работоспособности (проба Каста, проба Гесса, воронкообразование, баллистический маятник и др.) измеряется только часть полной работы взрыва ВВ и абсолютное ее значение зависит от метода измерения, а относительная работоспособность ВВ практически остается постоянной. Это позволяет определять ее одним наиболее простым методом, а ожидаемые результаты по другим методам предсказывать, если необходимо, по соответствующим корреляционным соотношениям [11–13].

Из экспериментальных методов определения относительной работоспособности ВВ наи-

более точным является метод подводного взрыва, а наиболее простым и легко выполнимым, но менее точным — метод воронкообразования (взрыв в породе). Обзор экспериментальных методов содержится в работах [3, 14]. В настоящей работе относительную работоспособность определяли вторым методом.

Известно несколько вариантов метода воронкообразования [15], из которых наиболее употребительны следующие. 1. Взрывают заряды постоянной массы на разной глубине заложения: от нуля до максимальной, при которой наблюдается камуфлет (отсутствие воронки выброса). Находят воронку выброса максимального объема и рассчитывают минимальный удельный расход ВВ: $q = Q/V_{\max}$. Этот параметр и служит характеристикой работоспособности ВВ. Этот вариант реализован в работе [16]. Оказалось, что он довольно трудоемок, для проведения взрывных работ требуются экскаватор и бульдозер. Полученные результаты не соответствуют действительности и не согласуются с расчетными энергетическими показателями Q и A_{id} . Аммонит 6ЖВ, граммонит 79/21, гранулотол и игданит насыпной плотности имеют одинаковую работоспособность при взрыве в песке: $q = 0,7 \text{ кг/м}^3$. Такой результат может быть связан с неправильным выбором соотношений размеров песчаного бассейна (яма в грунте размером $5 \times 5 \times 2,2 \text{ м}$ (на один заряд), засыпанная песком) и размеров заряда (диаметр 145 мм, длина 450 мм, стальная оболочка толщиной $5 \div 6 \text{ мм}$, масса $\approx 6 \text{ кг}$). Оптимальная глубина заложения зарядов равнялась $\approx 160 \text{ см}$. Заряды ставились вертикально и подрывались с нижнего торца. Взрыв несферический (имеет определенную направленность вверх), нижняя граница грунта отстоит от заряда всего на 60 см, значит, есть отраженная от дна ямы волна, которая также направлена вверх. После нескольких взрывов стенки ямы уплотнялись и фактически при последующих взрывах зарядов разных ВВ из грунтовой «чаши» выбрасывался один и тот же объем песка. Подобный результат получен и при испытаниях ВВ в гранитном массиве. Для таких ВВ, как аммонит 6ЖВ, игданит, смесь аммонита 6ЖВ с 20 % алюминия и водонаполненный тротил, значения q оказались практически одинаковыми, хотя скорости детонации и теплоты взрыва значительно различались. 2. Взрывают заряды разной массы при постоянной глубине заложения. Нахо-

дится масса заряда, при которой объем воронки выброса максимален (нормальная воронка выброса). Эта масса и служит характеристикой работоспособности ВВ. Вторым вариантом проще первого, поскольку взрывы можно проводить на малой глубине ($\approx 50 \text{ см}$), использовать заряды небольшой массы ($\approx 0,5 \text{ кг}$) и обходиться без громоздких машин.

В последние десятилетия широкое распространение получили низкочувствительные промышленные ВВ, представляющие собой грубодисперсные и водосодержащие (в том числе и эмульсионные) смеси на основе аммиачной селитры. Их критические диаметры детонации составляют в основном $100 \div 200 \text{ мм}$ [4]. Поэтому большинство существующих лабораторных методов определения работоспособности, разработанных в свое время для испытаний бризантных индивидуальных и мелкодисперсных смесевых ВВ (аммониты, динамиты) с небольшим критическим диаметром детонации ($10 \div 30 \text{ мм}$), непригодно для новых промышленных ВВ. Небольшие размеры и массы зарядов, используемые в этих методах (диаметр $10 \div 40 \text{ мм}$, масса $10 \div 300 \text{ г}$), не обеспечивают нормальной детонации новых ВВ. Поэтому были разработаны новые методы испытаний промышленных ВВ, учитывающие большой критический диаметр крупнодисперсных простейших и водонаполненных ВВ. Например, для определения работоспособности предложены следующие методы.

1. Заряды испытываемого ВВ массой 3,63 кг взрывают в скважинах диаметром 76 мм, пробуренных в однородной горной породе. Измеряют деформацию горной породы, которая и служит мерой взрывной эффективности [17].

2. По методу воронкообразования взрывают сосредоточенные заряды массой до 4,5 кг в однородной крепкой породе в скважинах различной глубины. Определяют оптимальную глубину заложения заряда (H_{opt}), при которой взрыв заряда образует воронку максимального объема [17].

3. В методе подводного взрыва [18] рекомендуется использовать сосредоточенные заряды ($l/d = 1 \div 2$) массой 8 кг. (Метод подводного взрыва рекомендован международной группой по стандартизации методов испытания ВВ EXTEST для стандартизации в странах НАТО [19].)

Отметим, что первым и вторым методами определяют относительную работоспособ-

ность ВВ, а третьим — полную работу взрыва, которую, как указано в [19], необходимо сравнивать с теплотой взрыва, рассчитанной термодинамическим методом. Например, для игданита экспериментальная энергия взрыва отличается от расчетной в два раза при массе заряда 1 кг и всего лишь на 5 % при массе заряда 8 кг. Некоторые новые методы описаны в [20]. Разработаны также и новые расчетные методы определения работоспособности. Один из таких методов, не требующий проведения эксперимента, рекомендуется в данной работе.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Авторы данной работы использовали метод воронкообразования при взрыве зарядов ВВ в песке [6]. Выбор песка обусловлен однородностью его физических параметров по объему и отсутствием прочности, что позволяет легко проводить взрывные работы без механизмов, возможностью многократного использования одной партии песка, его доступностью и дешевизной. Использовался вариант метода, разработанного в Институте горного дела им. А. А. Скочинского под руководством Б. Н. Кукиба [21, 22]. В основу метода положены следующие экспериментальные данные.

1. Для разных ВВ и разной массы зарядов были измерены значения H_{opt} и построена зависимость этой величины от энергии заряда, имеющая вид $H_{opt} = 0,2(1 + 1,2 \cdot 10^{-3}E)$, где H_{opt} измеряется в метрах, энергия взрыва E — в килоджоулях.

2. Измерялись объемы воронки выброса (W) в зависимости от массы и формы зарядов при постоянной глубине заложения. Оказалось, что эта зависимость хорошо описывается формулой

$$W(M) = C(M - M_0)^n, \quad (2)$$

где C и n — опытные константы, M_0 — масса заряда ВВ, при которой наблюдается камуфлет.

3. Работа взрыва характеризуется объемом воронки взрыва, а относительная работоспособность исследуемого ВВ — отношением массы заряда исследуемого ВВ к массе заряда эталонного ВВ, при взрыве которых образуются воронки равных объемов.

4. Относительная работоспособность ВВ практически не зависит от массы заряда в диапазоне $M = 250 \div 500$ г, что является достоин-

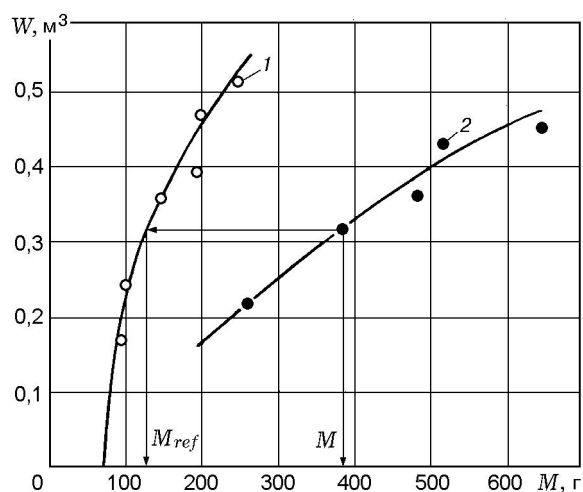


Рис. 1. Результаты взрывов в песке зарядов эталонного ВВ (кривая 1, калибровочная) и модельного состава ПЖВ-60 (кривая 2)

ством метода, поскольку не накладывает жестких ограничений на массу заряда и глубину заложения.

Работа проводилась в следующей последовательности. Для исследуемого ВВ рассчитывали теплоту взрыва. Затем выбирали массу заряда (обычно 400 г). По градуировочной кривой «энергия заряда — глубина заложения» находили оптимальную глубину заложения: 35 ÷ 40 см. Использовался сосредоточенный цилиндрический заряд, высота которого равнялась диаметру. Взрывали 3–5 зарядов исследуемого ВВ, а между ними — заряды стандартного ВВ (аммонита 6ЖВ) разной массы. Для аммонита 6ЖВ строили зависимость вида (2), в нее подставляли объем воронки, полученный при взрыве зарядов исследуемого ВВ, и находили массу эквивалентного заряда аммонита 6ЖВ. Относительную работоспособность (экспериментальную) определяли как отношение последней к массе заряда.

На рис. 1 приведена графическая иллюстрация метода. Кривая 1 (калибровочная) отражает результаты взрывов зарядов эталонного ВВ — аммонита 6ЖВ, а кривая 2 — соответствует исследуемым ВВ — смеси аммонита 6ЖВ с 60 % NaCl. В данном случае работоспособность исследуемого ВВ ниже, чем у аммонита.

Проведены две серии взрывов. В первой серии исследовались модельные составы — смеси аммиачной селитры с 4, 7 и 13,5 % тротила (Ам-4, 7 и 13,5) и смеси аммонита 6ЖВ с

Таблица 1

Относительная работоспособность модельных составов

Состав	M , г	W , м ³	f
Ам-13,5	251	0,45	0,765
		0,453	0,845
		0,505	1,00
		0,530	0,904 (0,86)
Ам-7	336	0,47	0,666
		0,519	0,781
		0,521	0,664
		0,529	0,676 (0,68)
Ам-4	398	0,472	0,571
		0,386	0,477
		0,494	0,608 (0,553)
ПЖВ-20	243	0,358	0,741
		0,368	0,749
		0,380	0,774
		0,382	0,774 (0,76)
ПЖВ-40	324	0,362	0,555
		0,363	0,562
		0,449	0,593
		0,608	0,608 (0,587)
ПЖВ-60	260	0,217	0,346
	390	0,312	0,359
	485	0,368	0,375
	515	0,431	0,359
	645	0,454	0,310 (0,35)

Примечание. В скобках указаны средние значения.

20, 40 и 60 % инертной добавки — хлористого натрия (ПЖВ-20, 40, 60), а во второй — смеси аммиачной селитры с алюминием (аммоналы). Результаты первой серии представлены в табл. 1. Как и ожидалось, с увеличением доли тротила в смеси с селитрой работоспособность смеси возрастает, а с увеличением содержания инертной добавки в смеси с аммонитом 6ЖВ — уменьшается. Относительная работоспособность смесей ПЖВ-20, 40 и 60 составляла соответственно 0,76; 0,59 и 0,36. В табл. 2 приведены термодинамические параметры модельных смесей и их относительная работоспособность. Как видно, изменение последней соответствует изменению теплоты взрыва ВВ.

Во второй серии взрывов исследовались смеси аммиачной селитры с алюминием с различным размером зерен алюминия (пудра и по-

рошок). Подрыв зарядов проводился различными инициаторами: № 1 (капсюль ЭД-8ПМ), № 2 (капсюль + 20 г аммонита 6ЖВ заводского приготовления) и № 3 (капсюль + 20 г аммонита № 6 ручного приготовления).

Вначале были проведены опыты со смесями аммиачной селитры с алюминиевой пудрой при использовании инициатора № 1. Плотность зарядов $\rho_0 = 1,0$ г/см³, диаметр 50 мм. Предполагалось, что алюминиевая пудра будет сгорать в детонационной волне с выделением значительного количества энергии. Оказалось, что это не так. Результаты опытов приведены в табл. 3. По данным для эталонного ВВ (аммонита 6ЖВ) построена зависимость типа (2): $\log W = -1,12 + 0,313 \log(M_{ref} - 85)$. Подстановкой в это выражение экспериментальных значений W получали массу эквивалентного заряда и затем рассчитывали относительную работоспособность по формуле $f = M_{ref}/M$. Результаты расчетов представлены в табл. 4, откуда следует, что работоспособность смесей аммиачной селитры с алюминиевой пудрой уменьшается с увеличением содержания пудры и она меньше, чем у аммонита 6ЖВ. По-видимому, частицы пудры обволакивают гранулы селитры и флегматизируют взрывчатый состав, и он детонирует в неидеальном режиме.

Затем опыты проводили со смесями, содержащими более крупный алюминиевый порошок — размер частиц $0,28 \div 0,355$ мм. Размер частиц селитры $0,2 \div 0,5$ мм. Использовались сосредоточенные заряды массой 200 г, диаметром 60 мм и высотой 65 мм и все три инициатора. Условия опытов и результаты взрывов приведены в табл. 5. Результаты экспериментов с аммонитом были обработаны методом регрессионного анализа, и получены соотношения типа (2). Например, для опытов с инициатором № 1 такое соотношение имеет вид $\log W = -1,04 + 0,245 \log(M_{ref} - 95)$. Подставляя в уравнения типа (2) объем воронок взрыва зарядов исследованных смесей, находили массу эквивалентного заряда аммонита (см. рис. 1) и по ней — относительную работоспособность смесей. Результаты представлены в табл. 6. Установлено сильное влияние способа инициирования зарядов на работоспособность смесей. Так, при инициировании зарядов инициатором № 1 максимальной работоспособностью 0,7 обладает смесь с 30 % Al; работоспособность смесей с 10, 20 и 40 % Al приблизительно одинакова и равна 0,5, что несколько меньше, чем у сме-

Таблица 2

Некоторые характеристики модельных взрывчатых составов

Состав	Q , кДж/кг	V , л/кг	Q/Q_{ref}	f	
				эксперимент	расчет
Аммонит	4305	893	1	1,00	1,00
Ам-13,5	3344	924	0,777	0,86	0,83
Ам-7	2497	951	0,580	0,68	0,67
Ам-4	2103	964	0,488	0,553	0,59
ПЖВ-20	3453	716	0,800	0,76	0,80
ПЖВ-40	2589	537	0,600	0,59	0,60
ПЖВ-60	1726	358	0,400	0,36	0,40

Таблица 3

Результаты взрывов зарядов смесей аммиачной селитры с алюминиевой пудрой

Состав смеси	Масса заряда, г	Диаметр воронки, м	Глубина воронки, м	Объем воронки, м ³
Аммонит 6ЖВ	100	1,32	0,39	0,178
АС/Al 90/10	200	1,53	0,50	0,306
	200	1,44	0,50	0,271
АС/Al 80/20	145	1,34	0,44	0,207
	145	1,28	0,42	0,188
Аммонит 6ЖВ	150	1,40	0,55	0,282
АС/Al 70/30	125	1,00	0,27	0,071
АС/Al 60/40	135	0,89	0,23	0,048
Аммонит 6ЖВ	200	1,49	0,58	0,337

сей аммиачной селитры с алюминиевой пудрой. В случае использования инициатора № 2 характер зависимости иной. Вначале работоспособность линейно возрастает и достигает максимума 1,53 для смеси с 30 % Al, а затем падает.

В смеси с 40 % Al последний полностью не реагирует: после взрыва на дне воронки остаются остатки исходного алюминия. Иницирующая способность промежуточных детонаторов, по-видимому, определяется их критическим диаметром детонации (d_{cr}). У аммонита заводского изготовления $d_{cr} \approx 13$ мм, а у аммонита ручного изготовления $d_{cr} \approx 18$ мм, т. е. последний детонирует в неидеальном режиме.

Для проверки этого предположения были проведены две дополнительные серии опытов: в одной использовалась смесь аммиачной селитры с порошком алюминия, в другой — с пу-

Таблица 4

Относительная работоспособность смесей аммиачной селитры с алюминиевой пудрой

Состав смеси	Инициатор	W , м ³	M_{ref} , г	$f_{эксп}$
АС/Al 90/10	1	0,288	156	0,78
	4	0,284	169	1,13
АС/Al 80/20	1	0,193	105	0,71
	4	0,333	206	1,37
АС/Al 70/30	1	0,071	86	0,69
	4	0,262	154	1,03
АС/Al 60/40	1	0,048	85	0,63
	4	0,266	157	1,04

Таблица 5

Результаты взрывов зарядов смесей аммиачной селитры с порошком алюминия

Состав смеси	Инициатор	Плотность ВВ, г/см ³	Диаметр воронки, м	Глубина воронки, м	Объем воронки, м ³
Аммонит*	№ 1	1,18	1,165	0,38	0,135
АС/А1 90/10	№ 1	0,97	0,6	0,2	0,019**
АС/А1 80/20	№ 1	1,06	1,01	0,34	0,091
АС/А1 70/30	№ 1	1,08	1,275	0,54	0,230
АС/А1 60/40	№ 1	1,09	1,32	0,51	0,233***
Аммонит*	№ 1	1,16	1,32	0,53	0,242
АС/А1 90/10	№ 2	1,00	1,33	0,47	0,218
АС/А1 80/20	№ 2	1,03	1,45	0,54	0,297
АС/А1 70/30	№ 2	1,12	1,59	0,52	0,344
АС/А1 60/40	№ 2	1,12	1,535	0,51	0,315***
Аммонит*	№ 1	1,12	1,47	0,505	0,286
АС/А1 90/10	№ 3	1,03	1,17	0,41	0,147
АС/А1 80/20	№ 3	1,04	1,33	0,46	0,213
АС/А1 70/30	№ 3	1,14	1,42	0,46	0,243
АС/А1 60/40	№ 3	1,14	1,54	0,48	0,298***
Аммонит*	№ 1	1,13	1,55	0,495	0,311

Примечания.

*Масса зарядов аммонита (последовательно сверху вниз) 100, 150, 200 и 250 г.

**Неполный взрыв, по-видимому, капсюль частично выпал из заряда.

***После взрыва на дне воронки наблюдались остатки А1.

двой, но в обеих сериях применялся мощный инициатор — таблетка гексогена массой 10 г, плотностью 1,72 г/см³. Скорость детонации гексогена $\approx 8,5$ км/с, аммонита — 4,2 км/с. Масса зарядов смесей 150 г, диаметр 60 мм, высота 50 мм. Результаты экспериментов приведены в табл. 6 (порошок), в табл. 4 (пудра) и на рис. 2. Видно, что работоспособность смесей как с порошком алюминия, так и с пудрой увеличилась. Максимальное значение 1,73 получено для смеси селитры с порошком алюминия состава 70/30. Влияние инициатора объясняется следующим образом. Изученные смеси имеют большой критический диаметр и детонируют при слабом иницировании (в условиях эксперимента) в неидеальном режиме, возможна и затухающая детонация. Повышение мощности инициатора приводит к тому, что в зарядах исследуемых смесей возбуждается пересжатая детонация. Чем выше мощность инициатора,

Таблица 6

Относительная работоспособность смесей аммиачной селитры с порошком алюминия

Состав смеси	Инициатор	W, м ³	M _{ref} , г	f _{эксп}
АС/А1 90/10	№ 1	0,019	95	0,486
	№ 2	0,218	111	0,553
	№ 3	0,147	82	0,411
	№ 4	0,302	195	1,30
АС/А1 80/20	№ 1	0,091	96	0,48
	№ 2	0,297	201	1,00
	№ 3	0,213	77	0,383
	№ 4	0,332	223	1,49
АС/А1 70/30	№ 1	0,230	139	0,700
	№ 2	0,344	305	1,523
	№ 3	0,243	130	0,652
	№ 4	0,368	260	1,73
АС/А1 60/40	№ 1	0,233	97	0,484
	№ 2	0,315	235	1,176
	№ 3	0,298	203	1,013
	№ 4	0,303	195	1,3

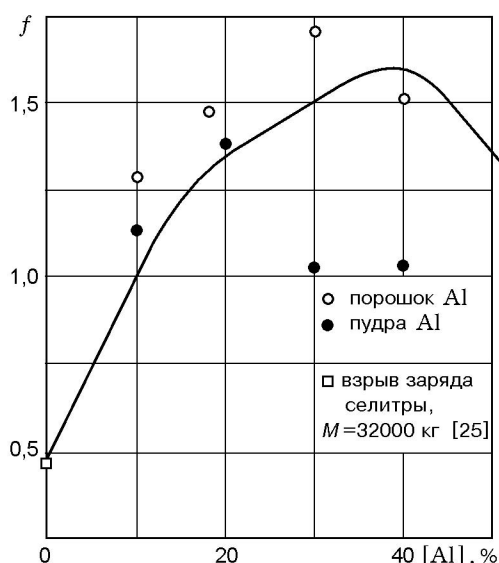


Рис. 2. Относительная работоспособность смесей аммиачной селитры с алюминием:

кривая — расчет по формуле (5), точки — эксперимент

тем выше интенсивность пересжатой детонации, тем на большую длину заряда она проходит (для пересжатой детонации нет понятия критического диаметра) и тем больше энергии выделяется при взрыве смеси. Очевидно, что при надлежащем выборе мощности инициатора и места расположения его в заряде можно добиться того, что пересжатая детонация охватит весь заряд, что приведет к полному выделению энергии смеси. Идеальный случай — заряд сферической формы с иницированием в центре. Мощность инициатора не влияет на вещества с малым критическим диаметром и высокой детонационной способностью (аммонит 6ЖВ, скальный аммонит, тротил). Полученные результаты показывают, что использование эффекта пересжатия (с соответствующим усовершенствованием узла иницирования) позволит применить метод воронкообразования к новым низкочувствительным ВВ при взрыве в песке.

Расчет работоспособности ВВ

Параллельно с экспериментальными исследованиями предлагались различные расчетные методы определения работоспособности ВВ. Самый простой из них — определение работоспособности по теплоте взрыва ВВ ($f = Q/Q_{ref}$), рассмотренный выше. Однако практика показала, что для некоторых классов ВВ

(составы на основе ионнообменных солей, алюминизированные составы) такой метод дает завышенные значения работоспособности. Поэтому было предложено учитывать в методах расчета и объем продуктов взрыва, так как именно они при расширении совершают работу, которая всегда меньше теплоты взрыва. Простая формула предложена в работе [23]:

$$f = (5Q/Q_{ref} + V/V_{ref})/6, \quad (3)$$

где V , V_{ref} — объем продуктов взрыва исследуемого и эталонного ВВ.

Видим, что вклад объема продуктов взрыва в относительную работоспособность составляет почти 17 %. В [6] методом корреляционного анализа результатов взрыва ≈ 20 ВВ в угле и в песке установлено, что наибольшее влияние на работу взрыва оказывает теплота взрыва ВВ (коэффициент корреляции 0,92), несколько меньшее — объем продуктов взрыва (0,897), а скорость детонации существенно не влияет на результаты взрыва (0,445). Этот результат представлен в виде формулы [11]

$$A = (0,68 \cdot 10^{-3}) Q^{0,77} V_0^{0,23} \beta^{0,47}, \quad (4)$$

$$\beta = D/0,069 \sqrt{Q}.$$

Однако для расчета работоспособности эта формула непригодна, поскольку коэффициент β , учитывающий неидеальность процесса детонации, содержит скорость детонации D , которую необходимо измерять экспериментально (здесь V_0 и V тождественны).

Подобный анализ данных табл. 1 и данных по работоспособности для аммонитов из работы [6] проведен авторами настоящей статьи. При этом из рассмотрения был исключен экспериментальный параметр — скорость детонации.

В результате обработки экспериментальных данных было установлено, что объем воронки взрыва и соответственно работа взрыва определяются выражением $A \sim W \sim (Q - 140\alpha)^{0,75} V_0^{0,25}$, где α — массовая доля инертной добавки. В отсутствие добавки $A \sim Q^{0,75} V_0^{0,25}$, и далее из определения $f = A/A_{ref}$ получаем формулу

$$f = \left(\frac{Q}{Q_{ref}}\right)^{0,75} \left(\frac{V}{V_{ref}}\right)^{0,25} = \left(\frac{Q}{1031}\right)^{0,75} \left(\frac{V}{893}\right)^{0,25}. \quad (5)$$

Таблица 7

ВВ	Относительная работоспособность ВВ		
	Относительная работоспособность ВВ		
	Q/Q_{ref}	по (3)	по (5)
Sufranex	1,35	1,28	1,22
Gomme F15	0,96	0,97	0,97
Minex F13S	0,79	0,84	0,86
N40R	0,86	0,89	0,91
N31R	1,13	1,10	1,08
NF4	0,80	0,85	0,87
N135	0,98	0,99	1,00
Gelsurite 2000	1,04	1,00	0,97
Gelsurite E1	0,63	0,70	0,71
Hydrolit AP	0,72	0,76	0,78
Iremite 110	1,19	1,09	1,02
Gel №2	1,09	1,07	1,07
Tolite	0,87	0,83	0,80
Pla-NP (пластик с 91 % тэна)	1,05	1,01	0,99

Здесь в качестве эталонного ВВ взят аммонит 6ЖВ. Впервые эта формула приведена в [24].

Расчетные значения относительной работоспособности ВВ по упрощенной формуле $f = Q/Q_{ref}$, формуле Лангефорса (3) и формуле (5) для промышленных ВВ приведены в табл. 7, 8: в табл. 7 — для зарубежных взрывчатых составов, рассчитанных по величинам Q и V_0 , приведенным в работе [13], в табл. 8 — для отечественных ВВ. Как для зарубежных, так и для отечественных ВВ результаты расчета по формуле Лангефорса и формуле (5) находятся в хорошем согласии.

Упрощенная формула $f = Q/Q_{ref}$ дает заниженные значения по сравнению с формулами (3) и (5) при $f < 1$ и завышенные — при $f > 1$. Считаем, что формулы (3) и (5), содержащие только два основных термодинамических параметра вещества — теплоту и объем газов взрыва, вполне адекватны для расчета относительной работоспособности промышленных ВВ. В табл. 2 в последнем столбце приведены значения f , рассчитанные по формуле (5).

Таблица 8

ВВ	Относительная работоспособность ВВ		
	Относительная работоспособность ВВ		
	Q/Q_{ref}	по (3)	по (5)
Граммонит 50/50	0,841	0,875	0,887
Граммонит 30/70	0,883	0,895	0,901
Гранулотол	0,970	0,947	0,933
ГЛТ-20	0,866	0,895	0,906
Гранулит АС-4	0,918	0,938	0,946
Гранулит АС-8	0,980	0,982	0,982
Ипконит	0,936	0,947	0,952
Игданит 94,5/5,5	0,894	0,926	0,939
Карбатол ГЛ-10В	1,130	1,100	1,083
Порэмит-1	0,708	0,761	0,777
АС	0,368	0,49	0,484

Как видим, согласие с экспериментом достаточно хорошее.

Расчет f для смесей аммиачной селитры с алюминием не представляет трудностей, однако неясно, какие значения Q и V_0 следует брать. Дело в том, что селитра может разлагаться в детонационной волне по разным механизмам с выделением как NO , так и O_2 , а алюминий может окисляться как до Al_2O_3 с выделением тепла, так и до AlO и Al_2O с поглощением тепла. Термодинамические расчеты и эксперименты показали, что введение алюминия в составы с небольшим положительным и отрицательным кислородным балансом не приводит к возрастанию скорости детонации и бризантности состава, при этом результаты практически одинаковы как в предположении полного сгорания алюминия, так и в предположении, что алюминий — инертная добавка. Поэтому в качестве иллюстрации приведем результаты расчета работоспособности указанных смесей лишь для одного случая: селитра разлагается по уравнению $\text{NH}_4\text{NO}_3 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{N}_2 + 0,5\text{O}_2$, общепринятому при высоких температурах, а алюминий окисляется до Al_2O_3 сначала кислородом, а потом — водой. Расчет проводился по формуле (5).

Расчетные и экспериментальные результаты работоспособности смесей селитры с

алюминием приведены на рис. 2, и, как видно, вполне удовлетворительно согласуются. Но расчетные данные лежат несколько ниже экспериментальных при содержании порошка алюминия $10 \div 30$ %; абсолютное различие в среднем составляет 15 %, что не превышает ошибки эксперимента. Как видно из рис. 2, введение $30 \div 40$ % алюминиевой пудры менее эффективно, чем введение такого же количества алюминиевого порошка: работоспособность смесей с пудрой более чем в 1,5 раза ниже, чем смесей с порошком.

Таким образом, формула (5) вполне пригодна и для расчета относительной работоспособности взрывчатых составов, содержащих алюминий, таких, как гранулиты АС-4 и АС-8 из табл. 8 и составы N31R, N135 и Gel №2 из табл. 7. Как видно, максимальная расчетная работоспособность соответствует содержанию алюминия 40 %, а экспериментальная — 30 %. (Расчет по упрощенной формуле дает очень высокие значения относительной работоспособности смесей ($f = 2,25$) при содержании алюминия 40 %.) На рис. 2 приведено экспериментальное значение $f = 0,47$ для чистой селитры, полученное в [25] при взрыве заряда селитры массой 32000 кг. Отметим еще, что в работе [26] определялась теплота взрыва смесей аммиачной селитры с алюминием в бомбе Долгова. Установлено, что максимальная теплота взрыва, равная 1700 ккал/кг (вода в жидком состоянии), выделяется при взрыве смеси, содержащей 30 % Al. Расчет же дает максимальное значение теплоты взрыва (2330 ккал/кг) при 40 % Al.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен метод определения работоспособности по воронкообразованию в песке грубодисперсных ВВ, работающих в режиме пережатой детонации. Получена формула для расчета относительной работоспособности промышленных ВВ, содержащая только два термодинамических параметра вещества — теплоту и объем продуктов взрыва, которые легко рассчитать без использования опытных данных. Формула не содержит и такого экспериментального параметра, как скорость детонации (ее можно рассчитать по формуле $D = 2,641 + 3,231\rho_0 \cdot 10^{-3} \sqrt{QV}$, содержащей те же два параметра: теплоту и объем газов взрыва). Расчетным путем и экспериментально по-

казано, что работоспособность смесей аммиачной селитры с алюминием может превышать работоспособность аммонита 6ЖВ более чем в 1,5 раза. Дальнейшее исследование должно быть направлено на опытное определение работоспособности смесей, содержащих $0 \div 10$ % Al, с целью установления механизма окисления алюминия в детонационной волне и создания уточненного метода расчета параметров детонации и работоспособности современных алюминизированных промышленных ВВ, содержащих $4 \div 8$ % Al.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Беляев А. Ф.** О полной работе взрыва // Физика взрыва. М.: Изд-во АН СССР, 1953. № 2. С. 27.
2. **Андреев К. К., Беляев А. Ф.** Теория взрывчатых веществ. М.: Оборонгиз, 1960.
3. **Дубнов Л. В., Бахаревич Н. С., Романов А. И.** Промышленные взрывчатые вещества. М.: Недра, 1988.
4. **Перечень** рекомендуемых промышленных взрывчатых материалов, приборов взрывания и контроля. М.: Недра, 1987.
5. **Ландау Л. Д., Станюкович К. П.** Об изучении детонации конденсированных взрывчатых веществ // Докл. АН СССР. 1945. Т. 46, № 9. С. 399.
6. **Поляк Г. А., Вайнштейн Б. И.** О выборе метода оценки работоспособности предохранительных ВВ // Взрывное дело. № 72/29. М.: Недра, 1973. С. 210–213.
7. **Болховитинов Л. Г.** О работоспособности ВВ // Взрывное дело. № 74/31. М.: Недра, 1974. С. 92–96.
8. **Давыдов В. Ю., Дубнов Л. В., Гришкин А. М.** Универсальный термодинамический критерий эффективности ВВ // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 4. С. 102–107.
9. **Нормативный справочник** по буровзрывным работам. М.: Недра, 1986.
10. **Кутузов Б. Н.** Взрывные работы. М.: Недра, 1988.
11. **Вайнштейн Б. И., Чернов К. С., Песоцкий М. К.** Анализ методов определения работоспособности ВВ // Взрывное дело. № 84/41. М.: Недра, 1982. С. 75–83.
12. **Авакян Г. А., Дубнов Л. В., Мельников А. А., Ким Ю. М.** Об экспериментальных и расчетных методах оценки работоспособности (фугасности) взрывчатых веществ // Взрывное дело. № 80/37. М.: Недра, 1978. С. 22–29.
13. **Blanc J.-P., Thiard R. L.** L'energie des explosifs // Explosifs. 1984. V. 37, N 1. P. 97–110.
14. **Кук М. А.** Наука о промышленных взрывчатых веществах. М.: Недра, 1980.

15. Демидюк Г. П. О методах оценки взрывных свойств простейших ВВ // Взрывное дело. № 74/31. М.: Недра, 1974. С. 119–133.
16. Мазин М. Ю., Литвинов Ю. М., Хромов В. Г., Шведов К. К. Метод определения работоспособности взрывчатых веществ // Методы испытаний низкочувствительных ВВ. Черногоровка: ОИХФ АН СССР, 1991. С. 109–129.
17. Техника открытых горных работ за рубежом / Под ред. акад. Н. В. Мельникова. М.: Госгортехиздат, 1962.
18. Bjarnholt G. Suggestions on standard for measurement and data evaluation in the underwater explosion test // Propellants and Explosives. 1980. V. 5, N 2/3. P. 67–74.
19. EХTEST international study group for the standardization of the methods of testing explosives // Ibid. P. 23–29.
20. Методы испытаний низкочувствительных ВВ: Сборник. Черногоровка: ОИХФ АН СССР, 1991.
21. Поляк Г. А., Левчик С. П., Кукиб Б. Н. Оценка эффективности предохранительных ВВ по результатам взрывов в песке // Взрывное дело. № 68/25. М.: Недра, 1970. С. 111–115.
22. Кукиб Б. Н., Иоффе В. Б., Александров В. Е. Оценка работоспособности ВВ по результатам взрывов в песке // Взрывное дело. № 84/41. М.: Недра, 1982. С. 83–87.
23. Johansson C. H., Langefors U. Methods of physical characterization of explosives / Proc. of the 36th Intern. Congress on Industrial Chemistry. Brussels. 1972. V. III. P. 610.
24. Афанасенков А. Н., Котова Л. И., Кукиб Б. Н. О работоспособности промышленных ВВ // Детонация: Материалы X Симпоз. по горению и взрыву. Черногоровка: ОИХФ АН СССР, 1992. С. 34–35.
25. Болховитинов Л. Г., Перник Л. М. Использование бинарной смеси АС-ДТ при проведении крупномасштабных взрывов // Энерг. стр-во. 1991. № 7. С. 42–45.
26. Меньшиков Б. А., Кукиб Б. Н., Иоффе В. Б. Исследование теплоты взрыва смесей аммиачной селитры и алюминия // Научные сообщения. Вып. 68. М.: ИГД им. А. А. Скочинского, 1969. С. 77–87.

*Поступила в редакцию 29/II 2000 г.,
в окончательном варианте — 4/VII 2000 г.*