

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ВВ МЕТОДОМ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ЗАРЯДОВ ПО ВЕЛИЧИНЕ РАСШИРЕНИЯ В БОМБЕ ТРАУЦЛЯ

А. Ф. Беляев, Р. Х. Курбангалина

(Москва)

Испытание в бомбе Трауцля является старейшим методом оценки работоспособности (фугасного действия) взрывчатых веществ (ВВ).

Бомба Трауцля представляет собой массивный цилиндр высотой 200 мм и диаметром 200 мм, отлитый из рафинированного свинца. Бомба имеет цилиндрическое отверстие диаметром 25 мм, идущее по оси бомбы на глубину 125 мм. На дно отверстия помещается заряд ВВ (обычно 10 г) с электродетонатором. Верхняя часть отверстия, не занятая зарядом, засыпается песком. В результате подрыва заряда в бомбе образуется расширение, величина которого в кубических сантиметрах, за вычетом объема цилиндрического отверстия (61—62 см³) и является мерой работоспособности взрывчатого вещества. Иногда из полученного значения вычитают также 30 см³ — поправку на эффект электродетонатора.

При подрыве заряда весом 10 г ВВ малой удельной энергии дают расширение 150—250 см³; ВВ средней энергии дают расширение 250—400 см³; ВВ большой энергии — 450—600 см³.

В статье [1] были изложены опыты и некоторые выводы по вопросу о механизме работы заряда в условиях бомбы Трауцля. Было установлено, что процесс расширения свинца бомбы длится 0.3—0.4 мсек от момента подрыва заряда; выброс газов происходит через 0.4—0.5 мсек от момента подрыва, т. е. после завершения расширения полости. Путем простых калориметрических измерений была определена абсолютная величина работы пластической деформации в свинцовой бомбе. Это дало возможность установить прямую связь между величиной расширения в бомбе и значением произведенной при этом работы.

В настоящей работе рассматривается связь расширения и истинной относительной работоспособности. (Напомним, что работоспособностью называют работу, которую способна произвести единица веса ВВ.) Часто фактически полагают, что эти две величины связаны простой линейной зависимостью. Предположим, например, что 10 г заряд какого-либо ВВ дает расширение в бомбе 200 см³, а 10 г заряд другого ВВ — 400 см³. Отношение расширений равно 2. Часто полагают, что в соответствии с отношением расширений отношение работоспособностей в данном частном случае также равно 2, что в любых условиях и в том числе в условиях практического использования ВВ, дающее в бомбе Трауцля вдвое большее расширение, способно произвести вдвое большую работу. Однако более детальный анализ показывает, что это простейшее предположение нуждается в существенном уточнении.

Изложенный ниже метод эквивалентных зарядов показывает, что в рассмотренном частном случае, когда расширение возрастет от 200 см³ до 400 см³, работоспособность возрастает в ~1,7 раза.

Сущность метода эквивалентных зарядов состоит в определении эквивалентного веса заряда аммонита 6, производящего такое же расширение, как и взятый заряд. Последний может составлять 10 г (как требуется стандартным испытанием) или несколько отличаться от 10 г. Совершенно обязательным условием использования метода эквивалентных зарядов является постоянство объема. Дело в том, что при изменении формы заряда не соблюдается подобие. Заряд большей высоты легче деформирует свинец и при одинаковой произведенной работе образует большую полость [1]. Если условие постоянства высоты и объема зарядов соблюдено, то одинаковым расширениям должна соответствовать одинаковая работа $A = aC$, где a — работоспособность ВВ (работа, производимая единицей веса) и C — вес заряда. Обозначим через C_x вес заряда данного ВВ и через C_6 (эквивалентный) вес заряда аммонита 6, производящий такое же расширение. Обозначим через a_x — работоспособность взятого вещества и через a_6 — работоспособность аммонита 6.

Поскольку веса зарядов (при соблюдении постоянства объемов) подобраны так, что расширения одинаковы, то, следовательно, одинаковы и произведенные работы $A_x = A_6$ или

$$a_x C_x = a_6 C_6, \quad \text{или} \quad \frac{a_x}{a_6} = \frac{C_6}{C_x}$$

Аммонит 6 выбран в качестве эталона потому, что он является наиболее детонационноспособным из числа широко используемых промышленных аммонитов. Конечно практически неудобно, испытывая заряд данного ВВ весом C_x , каждый раз подбирать значение эквивалентного заряда аммонита 6, производящего такое же расширение. Поэтому нами была снята кривая зависимости расширения в бомбе Трауцля от веса заряда аммонита 6, которой в дальнейшем мы и пользовались. Как уже отмечалось выше, для соблюдения условий подобия необходимо использовать заряды постоянно-

го объема и высоты; при этом требовании вес заряда мы, очевидно, могли менять только за счет изменения плотности. Аммонит 6 в качестве эталона выгоден еще и потому, что его удельная теплота практически не зависит от плотности (у тротила, например, удельная теплота значительно увеличивается с повышением плотности). Правда, любое ВВ большей плотности имеет большее начальное давление газов взрыва, что должно несколько увеличить расширение бомбы; однако, этот дополнительный эффект не должен превышать 2—3% величины расширения и им можно пренебречь.

Практически опыты проводились нами в следующих условиях: при стандартном испытании берут вес 10 г. При плотности $\rho = 1,0$ это дает объем заряда 10 см^3 . С учетом объема, занимаемого электродетонатором, размеры зарядов были следующими: диаметр $d = 25 \text{ мм}$ и высота $h = 21,4 \text{ мм}$. Вес зарядов аммонита в наших опытах менялся от 6 до 13 г; в соответствии со сказанным выше менялась плотность заряда; диаметр же и высота были неизменными ($d = 25 \text{ мм}$ и $h = 21,4 \text{ мм}$). Для более точной фиксации плотности и начального объема мы несколько изменили стандартные условия снаряжения: в наших опытах ВВ прямо засыпали в отверстие бомбы и подпрессовывали до нужной плотности специальным устройством; одновременно с подпрессовкой образовывалось отверстие под электродетонатор, заглубленное на половину длины заряда.

Полученные данные приведены в табл. 1.

Отметим, что расширения приведены с вычетом объема начального отверстия ($\sim 61 \text{ см}^3$), но без поправки на электродетонатор.

Данные табл. 1 нанесены на график (ось абсцисс — расширения, ось ординат — вес заряда). Нижняя кривая дает связь расширения с весом заряда без учета электродетонатора. Обычно поправку на электродетонатор вносят, вычитая из величины расширения 30 см^3 (полагая тем самым, что при любом заряде сам электродетонатор дает расширение 30 см^3). Отметим, что если из расширения для стандартного 10 г заряда вычесть 30 см^3 , то получится практически то же значение $393 - 30 = 363 \text{ см}^3$, которое рекомендуется для аммонита 6 в качестве стандартного.

Поправка вводилась следующим образом: в бомбе одновременно были взорваны 7 капсулей-детонаторов № 8. Установлено, что при этом расширение составляло 235 см^3 . Такое же расширение дает подрываемый электродетонатором заряд аммонита 6 весом 6,5 г. Из этого следует, что 6 капсулей-детонаторов эквивалентны 6,5 г аммонита 6 или 1 капсуль-детонатор (электродетонатор) № 8 эквивалентен $1,08 \text{ г} \approx 1,1 \text{ г}$. Из этого непосредственно следует, что, например, расширение 393 см^3 производят не 10, а 11,1 г аммонита 6 (10 г — основной заряд и 1,1 г — эквивалент электродетонатора).

Верхняя кривая на фиг. 1 дает связь расширений с весом заряда с учетом наличия электродетонатора. Построение этой кривой ясно из предыдущего. Для любого значения абсциссы ордината увеличивается на 1,1 г (эквивалент электродетонатора). Очевидно, что верхняя кривая должна проходить через начало координат.

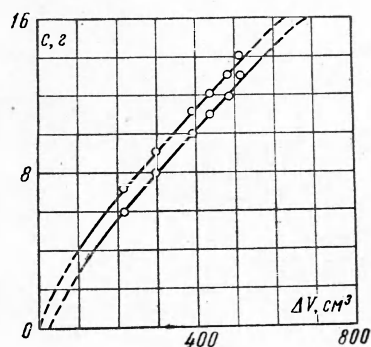
Сравнивая две кривые (переход по горизонтали от одной кривой к другой должен давать величину расширения, обусловленную капсулем-детонатором), мы видим, что величина поправки зависит от степени расширения: при расширении $\sim 150 \text{ см}^3$ она порядка, 30 см^3 , при $\sim 200 \text{ см}^3$ — порядка 40 см^3 ; при $300 - 45 \text{ см}^3$ и т. д.

Рассмотрим некоторые выводы, следующие из полученных данных. Прежде всего отметим, что отсутствует простая линейная связь между величиной расширения и суммарным весом заряда (включая электродетонатор), что указывает на отсутствие простой линейной связи между величиной расширения и полной работой взрыва (пропорциональной весу заряда). При переходе от заряда общим весом 6 г к заряду общим весом 12 г, имеющему вдвое большую энергию, расширение возрастает не вдвое, а примерно в 2,5 раза.

Таблица 1

Значение расширения бомбы ΔV от взрыва различных по весу C_6 зарядов аммонита 6 с различной плотностью ρ

$C_6, \text{ г}$	$\rho, \text{ г/см}^3$	$\Delta V, \text{ см}^3$	$\Delta \bar{V}, \text{ см}^3$
6	0.6	214	217
6	0.6	220	
8	0.8	291	296
8	0.8	301	
10	1.0	406	393
10	1.0	380	
11	1.1	425	435
11	1.1	445	
12	1.2	476	482
12	1.2	476	
12	1.2	494	
13	1.3	488	510
13	1.3	533	



Для увеличения расширения от 200 до 400 см^3 нужно увеличить вес заряда всего лишь в 1.7 раза.

Следовательно, при увеличении заряда величина расширения возрастает быстрее, чем вес заряда, определяющий его полную работу.

В сообщении [1] уже отмечалось, что при небольших расширениях работа пластической деформации свинца в бомбе составляет около половины полной энергии взрыва; при значительных же расширениях работа деформации составляет примерно две трети всей энергии. Остановимся на причинах этого явления. Одна причина неоднократно отмечалась; по мере расширения бомбы стенки ее становятся тоньше, сопротивление их уменьшается. Нужно вместе с тем отметить, что эта причина становится существенной при весьма значительных расширениях, превышающих 500—600 см^3 .

На практике испытаний ВВ расширения обычно заключены в пределах 200—500 см^3 . В таких пределах утончение стенок бомбы не столь существенно, поэтому необходимо учесть другую причину. Дело в том, что расширение внутренней полости — деформация свинца — не является единственной работой в условиях бомбы Трауцля. Некоторая доля полной работы уходит также на выброс песка, выброс газов и образование ударной волны в воздухе; этой долей работы в условиях бомбы Трауцля пренебречь нельзя. При увеличении веса заряда возрастают все виды работы, но работа выброса песка возрастает сравнительно медленно; доля энергии, идущей на выброс песка, уменьшается; соответственно увеличивается доля энергии, идущей на деформацию свинца. Это обстоятельство, а также хотя бы небольшое уменьшение сопротивления стенок по мере их расширения и приводит, в конечном счете, к тому, что расширение возрастает несколько быстрее, чем вес заряда.

Между тем в условиях практики (понятно при обязательном соблюдении подобия как в расположении зарядов, так и в условиях взрыва) вдвое больший заряд дает вдвое больший выброс (для соблюдения условий подобия он должен находиться на глубине, большей в $2^{1/3}$ раза), вдвое больший объем разрушенной породы и вдвое больший объем «котла» при расширении полости в грунте. В последнем случае работой, идущей на выброс забойки, можно пренебречь, утончение «стенок» практически отсутствует и, в отличие от условий в бомбе Трауцля, расширение в грунте практически будет линейно связано с весом заряда. Из всего этого следует вывод, что сравнение ВВ по эквивалентным весам дает больше оснований для количественной характеристики ВВ, чем непосредственное сравнение по расширениям в бомбе Трауцля. Наличие фиг. 1 позволяет перейти от расширений к эквивалентным зарядам, и, таким образом, определить относительную работоспособность. При определении эквивалентных зарядов можно пользоваться как нижней, так и верхней кривой на фиг. 1. Нижняя кривая прямо дает значение эквивалентного веса заряда аммонита 6. Пользуясь верхней кривой, нужно каждый раз вычитать 1.1 г (эквивалент электродетонатора).

Из данных графика вытекает, что 10 г заряд гексогена (расширение ~495 см^3) эквивалентен 12.2 г аммонита 6. Отсюда относительная работоспособность гексогена (по отношению к аммониту 6) — 1.22; соответственно относительная работоспособность тротила малой плотности (расширение от 10 г — 310 см^3) — 0.82 и тротила большой плотности — 1.0.

Отметим, что отношение удельных теплот гексогена и аммонита ~1.23; тротила и аммонита — ~0.825. Эти отношения практически совпадают с приведенными выше отношениями работоспособностей.

Не следует, однако, полагать, что такое совпадение будет всегда наблюдаться. Свойства продуктов взрыва аммонита 6, гексогена и тротила — близки; в частности этих практически совпадают значения C_p/C_v . В результате доля энергии, способной превратиться в работу (механический кпд взрыва), для них одинакова. Именно поэтому отношения работоспособностей (полученные из данных о расширении бомб методом эквивалентных зарядов) практически совпадают для этих ВВ с отношением удельных теплот.

Если свойства продуктов различаются, то отношение работоспособностей и удельных теплот не будет совпадать. В качестве примера рассмотрим данные по простейшему аммоналу 80/20 (смесь 20% алюминиевой пудры и 80% аммиачной селитры). При взрыве этого ВВ выделяется весьма значительное тепло, но вместе с тем в продуктах образуется большое количество взвеси Al_2O_3 , что уменьшает долю энергии, способной превратиться в работу.

Соответственно относительная работоспособность аммонала (расширение от 10 г — 530 см^3), полученная методом эквивалентных зарядов (~1.3) значительно ниже отношения теплот (1.5—1.55). Полученное отношение работоспособностей (~1.3) справедливо для условий значительного расширения продуктов взрыва, что характерно и для бомбы Трауцля и, в большинстве случаев, для условий практического применения ВВ.

Если условия таковы, что расширение продуктов невелико, отношение работоспособностей будет меньше. Так, например, в условиях баллистической mortarы при степени расширения 8.25, где продукты взрыва, толкающие поршень-снаряд, быстро вырываются наружу, работоспособность аммонала, как показано авторами данной статьи [2], лишь в 1.1 раза выше работоспособности аммонита 6.

В табл. 2 приведены данные, полученные для зарядов стандартных размеров весом 10 г (следовательно, плотности всех зарядов были порядка 1.0). Эта таблица при-

ведена для весьма ограниченного числа ВВ, однако она включает важнейшие из них.

Как уже отмечалось выше, оценка эквивалентного заряда и оценка относительной работоспособности может быть получена и при использовании зарядов другого веса; постоянными должны соблюдаться размеры заряда; в таблице значения расширений ΔV приведены без вычета эффекта электродетонатора; значение C_9 — это вес эквивалентного заряда аммонита 6, (a_x/a_6) — относительная работоспособность,

Для ВВ, указанных в табл. 2, значения расширения ΔV следует признать достаточно надежными. Для некоторых ВВ аналогичные сведения должны быть существенно уточнены. Так, например, для аммиачной селитры в литературе приводятся значения от 165 до 230 $см^3$. Нужно иметь в виду, что обычно используемые капсули-детонаторы, снаряженные тетриллом, дают значительное количество продуктов неполного сгорания, аммиачная же селитра обладает избыточным кислородом. При реакции продуктов неполного сгорания тетрила (CO , C , H_2 , CH_4 и т. д.) с кислородом селитры должно выделяться относительно большое количество тепла (до 50% тепла, выделяющегося при взрыве 10 г аммиачной селитры). В результате выделения дополнительного тепла расширение в бомбе будет значительно больше, чем от взрыва 10 г.

Если подсчитать относительную работоспособность селитры без учета взаимодействия селитры и капсуля-детонатора, то получится относительно высокое значение $a_x/a_6 \approx 0.60-0.65$; если учесть взаимодействие, то окажется, что $a_x/a_6 \approx 0.40-0.50$. Поэтому определение расширения в бомбе Трауцля, а также относительной работоспособности аммиачной селитры нуждается в уточнении; точно так же требуют уточнения данные для некоторых предохранительных ВВ.

Выше приведены данные об относительной работоспособности ВВ малой плотности ($\rho \approx 1.0$). Для ВВ большой плотности и, в частности, жидких, указанный метод оценки принципиально также применим. Однако для этого нужны дополнительные опыты по зависимости расширения от веса заряда какого-либо вещества, принятого за эталон (например, тэн). Вес зарядов должен быть уменьшен за счет высоты, а также возможно за счет диаметра (~ 20 мм). При стандартных размерах заряды мощных ВВ большой плотности будут давать недопустимо большое расширение или же просто разрушать бомбу.

Выводы. 1. Данные о величине расширения в бомбе Трауцля, полученные методом эквивалентных зарядов, могут быть использованы для оценки истинной относительной работоспособности ВВ. Для этого необходимо при помощи специально построенного графика определить эквивалентный вес заряда аммонита 6 (или другого ВВ, принятого за эталон), дающий такое же расширение, что и данный заряд. Объемы (высоты) зарядов должны быть одинаковы.

2. Для ВВ с близкими свойствами продуктов взрыва отношение истинных работоспособностей, полученных из величин расширения, практически равно отношению удельных теплот.

3. Если продукты взрыва содержат многоатомные молекулы или взвесь конденсированной фазы, то отношение работоспособностей меньше отношения удельных теплот.

Поступила
13 I 1960

ЛИТЕРАТУРА

1. Б е л я е в А. Ф. и К у р б а н г а л и н а Р. Х. Определение работоспособности ВВ в свинцовой бомбе. Сб. «Физика взрыва» № 5, 1956, 35—54.
2. Б е л я е в А. Ф. и К у р б а н г а л и н а Р. Х. Определение работоспособности некоторых ВВ с помощью баллистической мортиры. Сб. «Физика взрыва» № 4, 1955, 47—65.

Таблица 2

Расширения ΔV , эквивалентные заряды C и относительные работоспособности стандартных зарядов (10 г) некоторых ВВ

ВВ	ΔV , $см^3$	C_9 , г	$\frac{a_x}{a_6}$
Тротил	310	8,2	0,82
Пикриновая кислота	335	8,7	0,87
Аммонит 9	350	9,1	0,91
Аммонит 6	390	10	1,00
Тетрил	390	10	1,00
Гексоген	495	12,2	1,22
ТЭН	500	12,3	1,23
Простой аммонал	530	13,0	0,30