

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАМЕТРОВ ВЫРОЖДЕННЫХ УДАРНЫХ ВОЛН¹

***С.Ю. Ганигин, А.Ю. Мурзин, М.В. Ненашев, П.В. Письменный,
И.Е. Хлыстова, А.А. Чеботаев***

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Описывается методика определения работоспособности, которая предполагает определение акустического тротилового эквивалента либо выражение его через параметры воздушной ударной волны, такие как амплитуда, длительность и импульс фазы сжатия или энергетические показатели регистрируемых акустических колебаний, порождаемых детонацией образцов вещества.

Ключевые слова: работоспособность, энергонасыщенные материалы, акустический тротиловый эквивалент, ударные волны, звуковое давление.

Введение

В настоящее время для экспериментальной оценки работоспособности энергонасыщенных веществ используют следующие методы: метод свинцовой бомбы, метод баллистической mortar и маятника, определение объема воронки выброса, образованной взрывом в грунте. Сравнительные характеристики указанных методов определения работоспособности представлены в таблице.

Методика определения работоспособности энергонасыщенных материалов по параметрам вырожденных ударных волн

Стандартные методики определения работоспособности энергонасыщенных материалов обладают рядом недостатков, среди которых основными являются: использование больших масс образцов испытуемых веществ, а также применение дорогостоящего оборудования и материалов.

Как отмечено в [1], мерой относительной работоспособности ВВ могут быть также величины тротилового эквивалента, расчетные или полученные по экспериментальным измерениям параметров воздушных ударных волн (ВУВ). Такими параметрами могут быть импульс фазы сжатия волны или избыточное давление на ее фронте. В качестве импульсометров используют маятниковые, поршневые и другие приборы. Избыточное давление измеряют напрямую или вычисляют по измеренной скорости ударных волн.

¹ Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

Сергей Юрьевич Ганигин (к.т.н.), доцент, каф. технологии твердых химических веществ.

Андрей Юрьевич Мурзин (к.т.н.), доцент, каф. технологии твердых химических веществ.

Максим Владимирович Ненашев (д.т.н.), профессор, проректор по научной работе.

Павел Владимирович Письменный, старший преподаватель, каф. радиотехнических устройств.

Ирина Евгеньевна Хлыстова, аспирант, каф. технологии твердых химических веществ.

Александр Анатольевич Чеботаев, аспирант, каф. технологии твердых химических веществ.

Сравнительная характеристика методов определения работоспособности энергонасыщенных материалов

Параметр	Метод			
	свинцовой бомбы	баллистической мортиры	баллистического маятника	по воронке выброса
Класс ВВ	ИВВ, БВВ	ИВВ, БВВ	ПВВ	ПВВ
Состояние испытуемых образцов	Порошкообразные, гранулированные вязко-текучие, жидкие, пластичные			
Масса образцов	Не менее 10 г	Не менее 10 г	Не менее 200 г	Несколько кг
Состав технических средств	Свинцовая бомба Трауцля m=80 кг, средство инициирования (ОШ, ЭД), образец ВВ, бумажная гильза, кварцевый песок, средства измерения объема	Баллистическая мортира m=350 кг, средство инициирования (ЭД и др.), образец ВВ, средства очистки и смазки рабочих поверхностей мортиры	Баллистический маятник m=10 т, средство инициирования (ЭД и др.), образец ВВ, средства очистки и смазки рабочих поверхностей маятника	Средство инициирования (ЭД и др.), образец ВВ

Методики определения тротилового эквивалента для взрывчатых веществ могут быть построены на основе широко известных эмпирических соотношений Садовского, связывающих давление ударной волны, расстояние от заряда до эпицентра взрыва и массу эквивалентного заряда тротила. В этих соотношениях используется переменная Садовского – Гопкинсона

$$R^* = R/G^{0,33}, \quad (1)$$

где R^* – приведенное расстояние;
 R – расстояние от эпицентра взрыва до заряда;
 G – масса заряда.

На основе источников [2] следует, что многие эмпирические соотношения, связывающие давление во фронте ВУВ с приведенной массой или расстоянием, имеют вид

$$\Delta P = A \cdot \frac{1}{R^*} + B \cdot \frac{1}{R^{*2}} + C \cdot \frac{1}{R^{*3}} + D, \quad (2)$$

где A, B, C, D – коэффициенты, найденные из опыта.

Подставляя выражение для приведенного расстояния, получаем:

$$\Delta P = A \frac{\sqrt[3]{M_{TNT}}}{R} + B \frac{(\sqrt[3]{M_{TNT}})^2}{R^2} + C \frac{(\sqrt[3]{M_{TNT}})^3}{R^3} + D, \quad (3)$$

где M_{TNT} – масса заряда тротила.

Приведем (3) к уравнению относительно массы заряда. Обозначим $X = \sqrt[3]{M}$, тогда

$$X^3 + BCR \cdot X^2 + ACR^2 \cdot X + (D - \Delta P)CR^3 = 0. \quad (4)$$

Находя из (4) значения массы тротилового заряда, можно сделать предположение об обобщении данных, полученных для тротила на другие вещества. Далее в та-

кой методике величина тротилового эквивалента определяется по известной массе заряда испытуемого вещества и рассчитанной эквивалентной массе тротила как

$$E_{TNT} = \frac{M}{M_{TNT}}. \quad (5)$$

Таким образом, подставляя в (5) известное значение массы испытуемого заряда и найденное из (4) значение эквивалентного тротилового заряда, можно определить тротильный эквивалент и принять его за меру работоспособности. Решение уравнения (4) может быть легко выполнено численными методами непосредственно в вычислительном устройстве системы измерения тротилового эквивалента.

Несмотря на целесообразность применения таких методов, разработанных и апробированных методик на их основе не найдено. В то же время использование параметров ВУВ позволяет снизить материалоемкость работ по измерению работоспособности и интенсифицировать процесс синтеза новых энергонасыщенных материалов, в частности с использованием микроразмерных компонентов. Для веществ с малым критическим диаметром детонации нет необходимости использовать для испытаний большие навески вещества.

Для измерения работоспособности в работе предлагается использовать подобие параметров ВУВ больших и малых взрывов и определять работоспособность как акустический тротильный эквивалент. При таком подходе используется результат механического действия взрыва, как и в случае методик, указанных в таблице, но воздействие на чувствительный элемент передается через упругую среду – воздух.

Основными преимуществами предлагаемой методики определения работоспособности по сравнению со стандартными являются следующие:

1) определение работоспособности по предлагаемому методу осуществляется на образцах с массой в десятки и сотни раз меньшей, чем в стандартных методиках по ГОСТ 4546-81;

2) в процессе проведения испытаний не используются дорогостоящие материалы, как, например, цилиндрические блоки из свинца высокой чистоты массой 80 кг в методе свинцовой бомбы (повторно свинец не используется);

3) процесс инициирования и регистрации измерительной информации осуществляется автоматически и синхронно;

4) в предлагаемой методике доступна к реализации автоматизация измерений, включающая протоколирование и статистическую обработку данных, а также ведение базы данных испытуемых веществ.

Качественно связь бризантного действия взрывчатых веществ с параметрами звуковых колебаний отражена в работе [3], где сопоставляли величины деформации оболочки зарядов образцов и мощность звуковых колебаний. Практический интерес представляет связь параметров акустических колебаний детонации в точках, расположенных на расстояниях, где скорость ВУВ становится равной скорости звука с работоспособностью бризантных ВВ. В экспериментах использовались вещества с разными значениями работоспособности, такие как ТЭН (работоспособность $\Delta V = 500 \text{ см}^3$), гексоген ($\Delta V = 495 \text{ см}^3$) и тетрил ($\Delta V = 390 \text{ см}^3$). Испытывались навески массой 50 мг. Инициирование осуществлялось сбросом груза массой 10 кг на копре К-44-2 в соответствии с методикой измерения чувствительности по ГОСТ 4545-88. Использовался электродинамический микрофон, установленный на расстоянии 3 м от образца. Зарегистрированные сигналы выравнивались по времени и определялись накопленные суммы квадратов отсчетов сигнала. Определялся акустический эквивалент работоспособности по параметрам взрыва опорного вещества (тротил) как

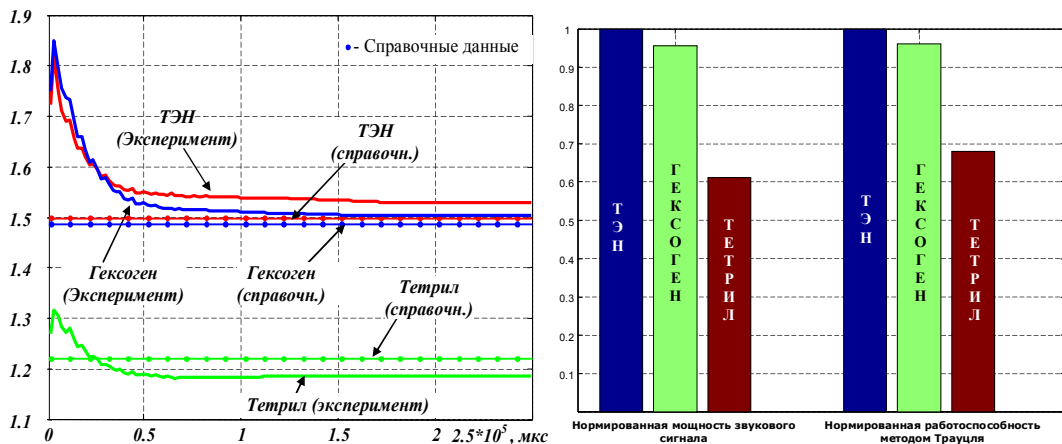
$$B = \frac{\sum_{i=0}^n s_{x_i}^2}{\sum_{i=0}^n s_{0_i}^2}, \quad (6)$$

где s_x – сигнал, полученный при «пробе» вещества с искомой работоспособностью;
 s_0 – сигнал, полученный при «пробе» вещества с эталонной работоспособностью (тротил).

Процедура обработки данных содержит механизм временного выравнивания реализаций сигналов. При этом за нулевой отсчет принимается момент времени, начиная с которого дисперсия реализации сигнала в окне из m отсчетов, соответствующем выбранному интервалу времени анализа, превышает предыдущее значение на заданную величину ε_1 . Сигнал $B(t)$ при одинаковых статистических характеристиках шума асимптотически стремится к некоторому фиксированному значению. Работоспособность (последний отсчет) определяется в точке, где дисперсия сигнала не превышает заданной величины ε_2 , соответствующей дисперсии шума:

$$\frac{1}{m} \sum_{i=0}^m \left(s_i - \frac{\sum_{i=0}^m s_i}{m} \right)^2 < \varepsilon_1; \quad \frac{1}{m} \sum_{i=0}^m \left(s_i - \frac{\sum_{i=0}^m s_i}{m} \right)^2 < \varepsilon_2. \quad (7)$$

На рис. 1 представлен результат эксперимента по определению относительной работоспособности, нормированной по тротилу.



Р и с. 1. Результат обработки эксперимента по определению относительной работоспособности, нормированной по тротилу

Алгоритм расчета (6) – (8) позволяет использовать только нормированные значения работоспособности и требует необходимости предварительных испытаний образцов эталонных веществ, например тротила. Это является обычной практикой и для других методов: поскольку, например, величина расширения объема свинцовой бомбы и отклонения баллистического маятника, а также высота подъема мортиры не находятся в линейной зависимости от истинной работоспособности [4], то получаемые по всем методам результаты характеризуют собой лишь относительную работоспособность. Их обычно сопоставляют с работоспособностью кристаллического тротила, принятого за эталон.

В то же время можно рассматривать другие варианты алгоритмов расчета абсолютных значений работоспособности, которые должны обладать свойством одно-

значности. Один из таких алгоритмов основан на измерении экстремума нормированной по времени удельной энергии сигнала звукового давления:

$$E = \frac{1}{t} \int_0^t s^2 dt. \quad (8)$$

Приравнивая производную этого соотношения к нулю, находим точки экстремума:

$$\frac{dE}{dt} = 0, \quad (9)$$

т. к. величина, обратная времени, не обращает это выражение в ноль нигде, кроме как на бесконечности, можно написать:

$$\frac{1}{t} s^2 - \frac{1}{t^2} \int_0^t s^2 dt = 0; \quad s^2 - \frac{1}{t} \int_0^t s^2 dt = 0. \quad (10)$$

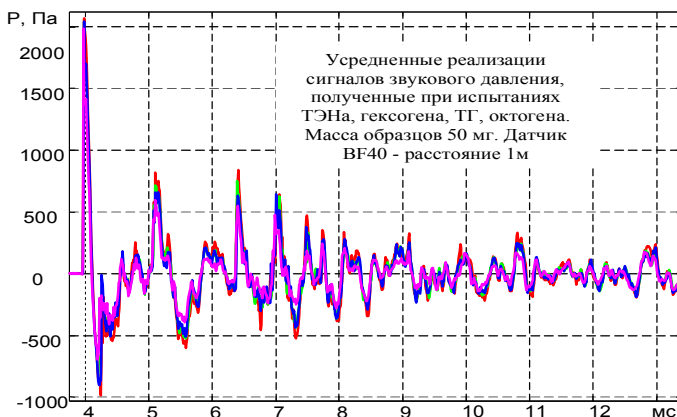
Окончательно значение работоспособности определяем как максимальное значение нормированной по времени удельной энергии (9)

$$A = \max \left[\bigcup_{i=0}^N E(t_i) \right], \quad (11)$$

где i – номера точек экстремума;

N – общее количество точек экстремума на усредненной реализации сигналов, полученных в эксперименте.

Для реализации алгоритма (8-11) были проведены испытания в соответствии с разработанной методикой определения работоспособности ВВ с использованием копра К-44-2. Некоторые результаты испытаний приведены на рис. 2. Для примера на рис. 2 приведен ансамбль усредненных реализаций по 3-м опытам сигналов звукового давления, полученных при испытаниях образцов ТЭНа, тротила, гексогена, октогена и ТГ-50 массой 50 мг.



Р и с. 2. Ансамбль усредненных реализаций сигналов звукового давления, полученный при испытаниях образцов ТЭНа, гексогена, ТГ-50, октогена массой 50 мг

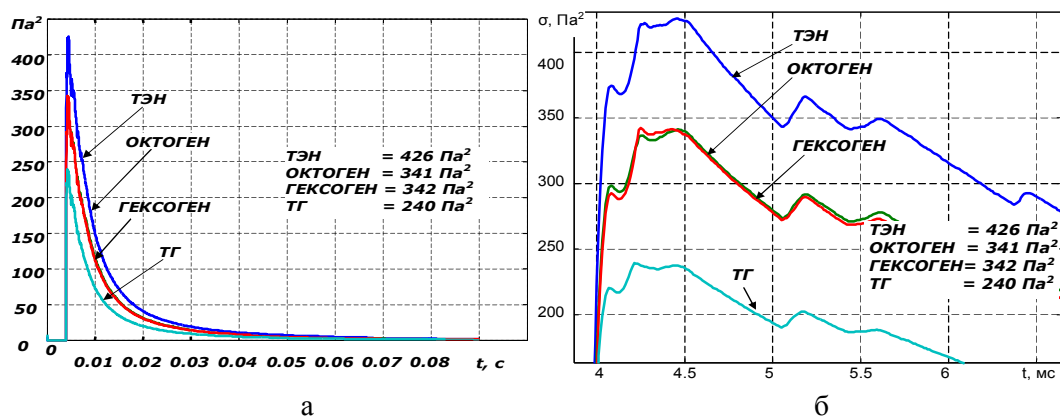
Использовался датчик звукового давления BF40 GRAS, установленный на расстоянии 1 м и направленный на образец. Ввиду особенностей работы емкостного микрофона реализации сигналов инвертированы. Максимальное зарегистрированное значение звукового давления не превышает 3000 Па или 165 дБ. Длительность первой положительной полуволны колебания не превышает 150 мкс. Длительность пер-

вой отрицательной полуволны не превышает 800 мкс. Реализации сигналов звукового давления приводились к нулевому уровню вычитанием постоянной составляющей. Расчет работоспособности осуществлялся на интервале 14 мс.

При разработке методики рассматривались различные способы удержания и инициирования навески ВВ. В частности, в зависимости от типа испытуемого материала (инициирующие или бризантные) использовалось размещение вещества и подпрессовка в стандартных малогабаритных колпачках капсулей. Также в зависимости от типа вещества осуществлялось инициирование непрерывным потоком тепла, тепловым импульсом, создаваемым лазерной установкой, передачей детонации от промежуточного слоя инициирующего вещества и т. д. При этом в процессе детонации происходит разлет осколков сформированного заряда ВВ и оболочки. Движение горящих осколков и продуктов детонации создает фронт паразитных ВУВ, опережающих ударную волну, которая порождается детонацией основной части вещества, размещенного в испытательном заряде. При этом в регистрируемом сигнале появляется акустический шум, предшествующий основной полуволне, интенсивность которого может быть значительной и зачастую искажает получаемые результаты.

Представленные результаты получены при использовании методики, в которой навеска ВВ заключена в роликовый прибор. Разлет осколков детонирующего вещества в такой конструкции исключен. Таким образом, в реализациях полученных сигналов наблюдаем один резкий скачок звукового давления во фронте продольной волны сжатия и отсутствие паразитных колебаний.

Временные диаграммы нормированной по времени удельной энергии сигнала на интервале 90 мс и 2 мс приведены на рис. 3, а, б.

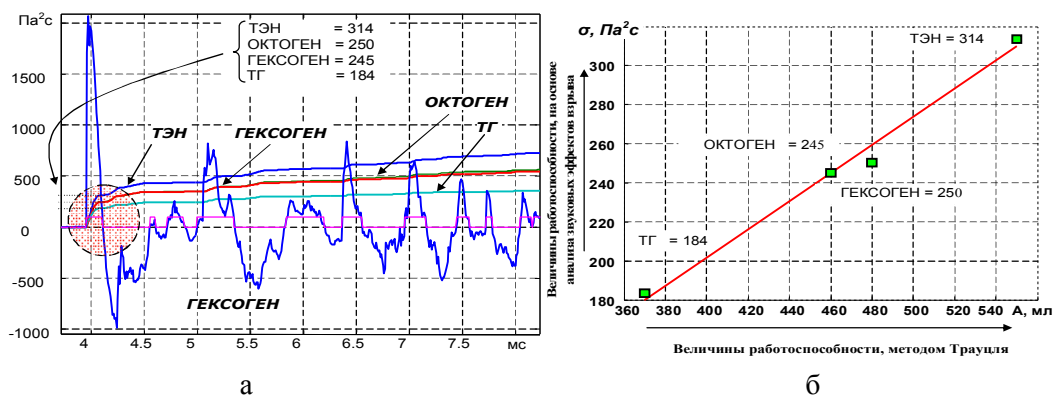


Р и с. 3. а – временные диаграммы накопленных сумм квадратов звукового давления (удельной энергии), нормированные по кумулятивной сумме отсчетов времени; б – иллюстрация к определению значения работоспособности по звуковому эффекту взрыва образца ВВ (используются максимальные значения)

Как видно из рис. 3, б, недостатком алгоритма расчета (8) – (11) является неоднозначность определения максимального значения этой характеристики, т. к. максимум может приходиться на первую, вторую или третью полуволну колебаний среды. Получаемые значения абсолютного эквивалента работоспособности имеют размерность [Па²]. Точность и повторяемость результатов измерений можно повысить, если работоспособность определять как отношение полученного значения к дополни-

тельно измеренному акустическому импедансу среды. Вводимая таким образом величина получает размерность плотности потока мощности.

На рис. 4, а продемонстрирован принцип определения работоспособности по звуковому сигналу взрыва, при котором рассчитывают удельную энергию сигнала звукового давления и находят значение этой характеристики в точке перехода усредненного сигнала через ноль. В этой точке характеристика удельной энергии сигнала звукового давления имеет экстремум.



Р и с. 4. а – иллюстрация к определению значения работоспособности по звуковому эффекту взрыва образца ВВ (используются накопленные суммы удельной энергии); б – соотношение акустического эквивалента работоспособности ВВ и работоспособности, полученной методом свинцовой бомбы

На рис. 4, а представлены временные диаграммы накопленных сумм квадратов звукового давления (удельной энергии), функция Хевисайда от усредненного значения временной диаграммы одного из испытуемых веществ и механизм определения абсолютных значений работоспособности.

Реализующее эти алгоритмы устройство должно иметь квадратор для определения мгновенных значений мощности, интегратор для расчета накопленной энергии, компаратор для сравнения и определения искомым значений, делитель для нормирования по времени значений удельной энергии, а также пиковый детектор. Рассмотренный алгоритм исключает неоднозначность. На рис. 4, б представлен график соотношений между работоспособностью, полученной по последней методике, и стандартными значениями, полученными по испытаниям в свинцовой бомбе.

Заключение

Очевидно, что анализ параметров звуковых колебаний, порождаемых детонацией ВВ, имеет практический интерес. В частности, может быть построена методика определения эффективности механического действия взрывчатых материалов, синтезируемых в малых количествах, с массами испытуемых образцов в десятки и сотни раз меньшими, чем требуется в стандартных методиках (от 10 г до 200 г). Возможно упрощение испытаний взрывчатых веществ на фугасное и бризантное действие путем снижения массы испытуемых образцов, материалоемкости и себестоимости. Адекватность получаемых результатов подтверждается сравнением относительной работоспособности, полученной акустическим методом, с результатами испытаний ВВ в свинцовой бомбе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. – Т.1. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 832 с.
2. Гельфанд Б.Е., Сильников М.В. Фугасные эффекты взрывов. – СПб.: Полигон, 2002. – 272 с.
3. Калаишиков В.В., Ненасhev М.В., Керов А.В., Ибатуллин И.Д., Ганигин С.Ю., Мурзин А.Ю., Письменный П.В., Чеботаев А.А., Кобякина О.А., Хлыстова И.Е. Использование акустических колебаний для качественного и количественного анализа ударно-волновых процессов, порождаемых детонацией взрывчатых веществ, газовых смесей и аэрозолей // Известия Самарского научного центра РАН. Том 13, № 1. – С. 355-360.
4. Авакян Г.А., Дубнов Л.В., Мельников А.А., Ким Ю.М. Об экспериментальных и расчетных методах оценки работоспособности (фугасности) взрывчатых веществ // Взрывное дело. – М.: Недра, 1978. – № 80/37. – С. 22-29.

Статья поступила в редакцию 12 сентября 2011 г.

METHODS OF ASSESSING THE PERFORMANCE OF ENERGY-USING MATERIAL PARAMETERS OF DEGENERATE SHOCK WAVES

S.U. Ganigin, A.U. Murzin, M.V. Nenashev, P.V. Pismennyj, I.E. Khlystova, A.A. Chebotaev

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

The paper describes the method for determination of efficiency, which involves the determination of acoustic TNT or its expression in terms of parameters by air shockwaves such as amplitude, duration, and pulse compression phase or energy indicators recorded by the acoustic oscillations generated by the detonation of the samples of the substance.

Keywords: *efficiency, high power materials, the acoustic equivalent of TNT, shock waves, the acoustic pressure.*

Sergey U. Ganigin (Ph.D. (Techn.)), Associate professor.

Andrey U. Murzin (Ph.D. (Techn.)), Associate professor.

Maksim V. Nenashev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

Pavel V. Pismennyj, Senior Lecture.

Irina E. Khlystova, Postgraduate student.

Alexander A. Chebotaev, Postgraduate student.