

## ПОРАЖАЮЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ СЛУЧАЙНОГО ВЗРЫВА НА ПРИМЕРЕ НЕКОТОРЫХ СМЕСЕВЫХ СОСТАВОВ

С. В. Мочалов, В. П. Удовиченко, Е. А. Петров

ФГУП «Федеральный научно-производственный центр «Алтай», 659322 Бийск, post@frpc.secna.ru

Рассмотрены вопросы, касающиеся зависимости параметров воздушной ударной волны от массы заряда и условий подрыва. Установлено, что тротиловый эквивалент смесевых взрывчатых веществ достаточно существенно изменяется при изменении массы заряда вплоть до предельных значений. По достижении предельных значений массы изменение тротилового эквивалента прекращается. Диапазон масс зарядов, в котором наблюдаются названные изменения, зависит от свойств взрывчатых веществ и тем меньше, чем менее выражен эффект стадийности при их детонации. Представленные экспериментальные данные соответствуют сделанным выводам.

Ключевые слова: детонация, ударная волна, тротиловый эквивалент, смесевые взрывчатые вещества, воронка.

Одним из важных элементов в комплексе мероприятий, обеспечивающих безопасность производства, хранения и транспортирования взрывчатых веществ (ВВ), является принцип выделения опасных зон. Суть его состоит в определении опасных расстояний от центра взрыва в зависимости от массы зарядов ВВ. Этот подход, базирующийся на законе подобия взрывных волн, широко и достаточно успешно применяется во всем мире, однако в некоторых случаях результаты, полученные на его основе, могут быть поставлены под сомнение. В первую очередь, это касается ситуаций, когда при детонации зарядов ВВ существенны так называемые «химические потери». Анализ, проведенный автором работы [1], показывает, что для тротила и его простых смесей зависимость химических потерь от массы заряда весьма сильна в области малых масс и с ростом массы заряда монотонно ослабевает, приближаясь к некоторой асимптоте.

Следует отметить, что в силу сложности проблемы до сих пор не создано корректной теории, описывающей упомянутое явление. В этой связи актуальным представляется решение вопроса о характере подобной зависимости для малоизученных сложных взрывчатых смесей, применяющихся и разрабатываемых в настоящее время в различных специальных областях техники.

В настоящей работе исследованы процессы формирования воздушных ударных волн (УВ) при детонации именно таких составов. Наибольший интерес с этой точки зрения мо-

гут представлять ВВ, способные к детонации в многостадийном режиме. Изучение этого явления началось достаточно давно. В частности, в работах [2, 3] отмечено существование низкоскоростных и высокоскоростных режимов детонации в некоторых взрывчатых смесях. С точки зрения авторов, скачкообразное снижение скорости детонации при увеличении потерь (уменьшение диаметра заряда) — это следствие селективности детонации по наиболее чувствительному компоненту смеси. Менее чувствительные компоненты вели себя при этом как инертные добавки.

Реализация многостадийного режима детонации, очевидно, должна приводить к увеличению времени химических реакций и снижению амплитуды давления в плоскости Чепмена — Жуге, что, в свою очередь, следует считать причиной поэтапного формирования воздушной УВ за счет последовательного действия УВ, распространяющихся по продуктам детонации.

Подобные представления дают право в качестве материала для анализа использовать данные о формировании воздушной УВ при подрывах любых взрывчатых смесей, где хоть как-то выражена стадийность детонации. Нами были отобраны результаты по подрыву нескольких групп достаточно сильно отличающихся друг от друга смесей: с содержанием нитроглицерина или смесевых нитроэфиров — НЭ—NH<sub>4</sub>Cl—NaNO<sub>3</sub>—NaCl (угленит); НГЦ—октоген—ПХА—Al—полимер; с содержанием активной добавки — октоген—ПХА—

Таблица 1

Состав	Массовая доля компонентов											
	НГЦ	ДНДЭГ	ПХА	Октоген	NaCl (KCl)	NH <sub>4</sub> Cl	NaNO <sub>3</sub>	Al	ГА	Полимер	ФК	Прочие
Угленит	0.07	0.07	—	—	0.07	0.29	0.46	—	—	—	—	0.04
№ 1	—	—	0.47	0.25	—	—	—	0.19	—	0.055	—	0.035
№ 2	—	—	0.344	0.196	—	—	—	0.09	0.16	—	0.161	0.051
№ 3	—	0.15	0.222	0.375	—	—	—	0.215	—	0.024	—	0.014
№ 4	0.13	—	0.14	0.497	—	—	—	0.19	—	0.034	—	0.008

Al—ГА—ФК—полимер; без содержания НГЦ и активных добавок — октоген—ПХА—Al—полимер (НЭ — нитроэфир, НГЦ — нитроглицерин, ПХА — перхлорат аммония, ГА — гидрид алюминия, ФК — бисэтиленформаль, ДНДЭГ — динитродиаэтиленгликоль). Принцип отбора заключался в выделении смесей, компоненты которых достаточно сильно различаются по чувствительности. Дополнительно рассматривались смеси с металлическим горючим, которое по данным многих авторов, например, работы [4], существенно увеличивает общее время реакций. Перечень и примерная рецептура изученных составов представлены в табл. 1.

Необходимо отметить, что экспериментальные работы проводились авторами в различное время на опытной базе ФГУП ФНПЦ «Алтай», при этом основной целью экспериментов были задачи, не связанные с проблематикой настоящей статьи, поэтому подрывы осуществлялись в различных условиях. Тем не менее, на наш взгляд, полученные результаты могут быть использованы для анализа по затронутому вопросу, и это в дальнейшем будет показано.

В настоящей статье представлены результаты работ по определению закономерностей изменения параметров воздушной УВ с расстоянием, зависимости тротилового эквивалента (ТЭ) от массы заряда, действия взрыва на выброс в наземных условиях (детонация на дневной поверхности).

Эксперименты проводились в рамках традиционной методики: заряды инициировались от электродетонатора посредством промежуточного заряда массой не более 3 % от массы основного заряда; скорость распространения воздушной УВ на различных расстояниях от центра взрыва регистрировалась при помо-

щи датчиков ЦИС-5, в отдельных экспериментах датчиками АИДА-М регистрировался импульс фазы сжатия воздушной УВ; обмер воронки и некоторых параметров выброса проводился при наземном расположении зарядов. Взрывы проведены в сопоставимых рельефных и климатических условиях, форма всех зарядов была близка к компактному цилиндру, расстояние от центра взрыва до датчиков выбиралось из расчета, чтобы на момент прохождения фронта воздушной УВ избыточное давление составляло не менее 0.05 МПа. Заряды малой массы (до 5 кг) подрывались над землей на высоте около 15 приведенных радиусов (что соответствует радиусу шара равной массы), часть из них подрывалась в прочных или массивных корпусах. При проведении экспериментов параметры регистрировались одновременно несколькими датчиками (обычно 3–4) в каждой точке наблюдения. Для каждой массы заряда (за исключением заряда массой 850 кг) проводилось от трех до пяти подрывов, как правило, в различное время года. Количество «счетных» экспериментов на каждую кривую составило в среднем около 50. Таким образом, при построении кривых обрабатывалось 150 ÷ 200 значений измеряемого параметра. При этом разброс упомянутых значений параметров не превышал 9 % от среднего значения. С учетом рельефных и атмосферных различий такой разброс можно считать нормальным. Результаты экспериментов отражены на рис. 1–3.

На рис. 1 представлены зависимости амплитуды давления в воздушной УВ от безразмерного расстояния (отношение расстояния от точки наблюдения до заряда к приведенному радиусу заряда) для перечисленных выше смесевых ВВ. Кроме того, здесь же представлены данные по подрыву зарядов литого троти-

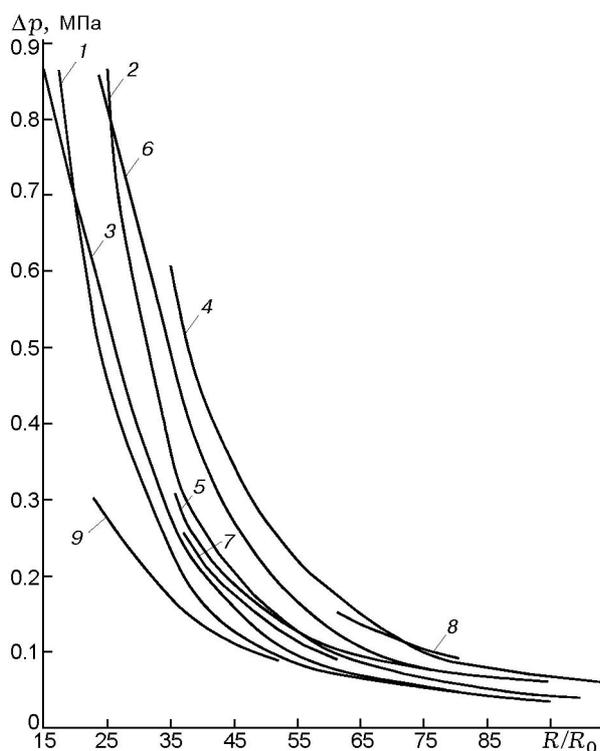


Рис. 1. Зависимость амплитуды воздушной ударной волны от относительного расстояния:

1 — малые заряды ТНТ (взрыв воздушный); 2 — зависимость Садовского для наземного взрыва; 3, 4 — малые и большие заряды состава № 1 (взрыв воздушный); 5, 6 — малые заряды состава № 2 (взрывы воздушный и наземный); 7 — малые заряды составов № 3 и 4 (взрыв воздушный); 8 — большие заряды составов № 2 и 4 (взрыв наземный); 9 — большие заряды угля (взрыв наземный)

ла малой массы (до 4 кг) и расчетная кривая зависимости Садовского для тринитротолуола (ТНТ).

Из рис. 1 видно, что для зарядов всех рассматриваемых составов малой и большой массы зависимости существенно отличаются на небольших расстояниях от центра взрыва как углом наклона, так и удаленностью друг от друга, но начиная с некоторого расстояния сближаются и становятся практически эквивалентными. Различия, вероятно, связаны с условиями подрыва (наземный и воздушный взрывы) и химическими потерями, зависящими от массы заряда.

Что касается зависимости амплитуды давления воздушной УВ от высоты расположения заряда, то с ростом расстояния от центра взрыва оправданно было бы ожидать ее ослабления вплоть до полного исчезновения. Это и на-

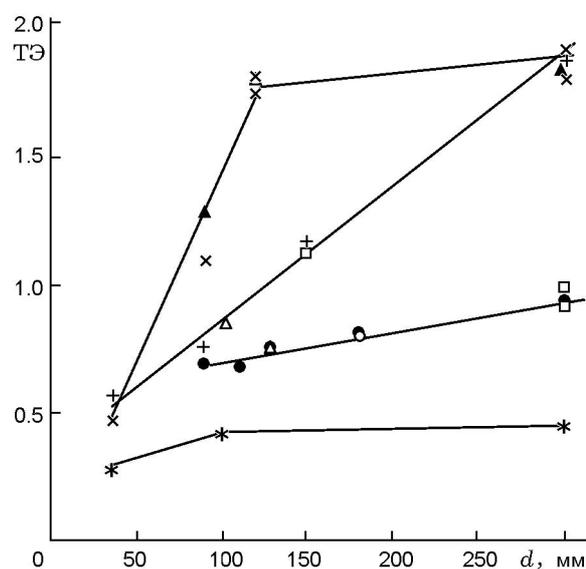


Рис. 2. Зависимость ТЭ от диаметра компактного заряда в свинцовой (□), стальной (○) и стеклопластиковой (Δ) оболочках, зарядов ТНТ (●), угля (∗) и составов № 1 (+), № 2 (×), № 4 (▲)

блюдалось в экспериментах по подрыву малых зарядов ТНТ (кривая 1) и состава № 2 (кривые 5 и 6): характерное расстояние, начиная с которого изменение амплитуды давления в воздушной УВ уже описывается зависимостью Садовского как для ТНТ, так и для смесевых ВВ (с применением коэффициентов пропорциональности), составляет примерно  $65 \div 70$  радиусов заряда.

Важно отметить, что для зарядов литого ТНТ малой массы (критический диаметр  $15 \div 18$  мм) ТЭ, как это видно из рис. 1 (кривая 1), возрастал с 0.35 на расстоянии 17.6 радиуса заряда до 0.7 на расстоянии 70 радиусов заряда, далее рост ТЭ прекращался. Это объясняется влиянием отражения волны от земной поверхности, т. е. в случае, когда точка регистрации находится на малых расстояниях от центра взрыва, возмущение, возникающее при отражении от поверхности земли, не успевает сказаться в точке регистрации, с увеличением же расстояния влияние упомянутого возмущения начинает проявляться все сильнее, приближаясь по характеру к наземному подрыву, что и вызвало практически пропорциональное увеличение ТЭ.

В описываемых экспериментах диаметр зарядов ТНТ изменялся от 90 до 110 мм, при этом изменение химических потерь было срав-

нимо с разбросом результатов экспериментов, т. е. «отличить» его от последних практически невозможно.

На рис. 2 показано изменение ТЭ в зависимости от диаметра компактного заряда. Здесь же представлены результаты подрыва зарядов в оболочке. Последние данные отложены на кривых только в соответствии со значением ТЭ вне зависимости от фактического диаметра заряда. Как явствует из кривой, при подрыве зарядов ТНТ диаметром 90 мм в прочных стеклопластиковых (толщина стенки 5 мм) и стальных (толщина стенки 3 мм) оболочках ТЭ увеличивался до значений  $0.75 \div 0.82$ , а при подрыве в свинцовых оболочках (толщина стенки 5 мм) — до  $0.92 \div 0.97$ . Те же самые значения ТЭ наблюдались при подрывах открытых зарядов ТНТ диаметром 300 мм (масса 34 кг). Таким образом, из приведенных экспериментальных результатов следует, что изменение ТЭ, зависящее, вероятнее всего, от химических потерь, существенно лишь в области малых масс (до  $30 \div 50$  кг).

Для смесевых составов сильная зависимость ТЭ от массы также наблюдается в интервале масс  $1 \div 30$  кг. Наиболее полные данные получены для состава № 1 (критический диаметр 35 мм, предельный диаметр  $70 \div 75$  мм). Из кривой 3 рис. 1 (подрыв в воздухе зарядов диаметром 90 мм) видно, что на расстоянии 15 радиусов ( $R/R_0$ ) значение ТЭ, определенного по амплитуде воздушной УВ, составляет 0.216, что несколько меньше аналогичного показателя для зарядов ТНТ равной массы (подрыв в воздухе), однако с увеличением расстояния ТЭ состава № 1 растет быстрее, чем ТЭ ТНТ, и на расстоянии примерно  $(19 \div 21)R/R_0$  становится равным значению последнего. Далее рост ТЭ постепенно замедляется и на расстоянии около  $70R/R_0$  прекращается на значении  $\approx 0.75$ , что весьма близко к ТЭ малых зарядов ТНТ. При подрывах зарядов состава № 1 диаметром 90 мм в стеклопластиковой оболочке (толщина стенки 5 мм) ТЭ возрастает, как это видно из рис. 2, до значения 0.85, а использование свинцовой оболочки толщиной 5 мм увеличивает его до 1.2. Приблизительно такие же значения ТЭ получены при подрыве зарядов диаметром 150 мм (масса  $\approx 5$  кг). Максимального значения ( $\approx 1.87$ ) ТЭ достигает для зарядов диаметром 300 мм (масса  $\approx 35$  кг), после чего роста ТЭ не наблюдается (эксперименты проведены вплоть до значений массы заряда 850 кг).

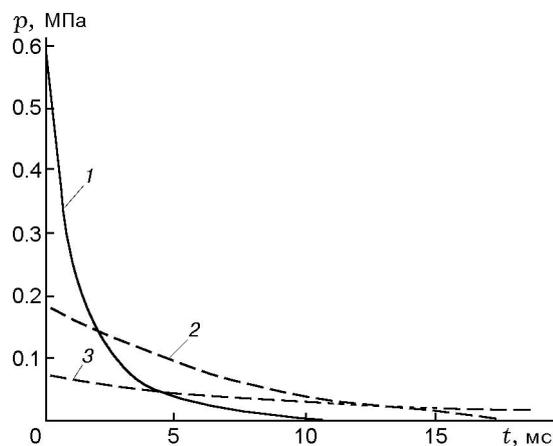


Рис. 3. Зависимость давления от времени в воздушной ударной волне на расстояниях  $35R/R_0$  (1),  $62.5R/R_0$  (2) и  $104R/R_0$  (3) от центра взрыва заряда массой 850 кг (состав № 1)

На рис. 3 представлена зависимость давления в воздушной УВ от времени на различных расстояниях от центра взрыва при подрыве заряда состава № 1 массой 850 кг. Видно, что зависимость времени фазы сжатия от расстояния более сильная, чем это предсказывается формулой Садовского, во всяком случае до расстояния  $65R/R_0$ . Так, например, если на расстоянии  $35R/R_0$  измеренное время фазы сжатия (10.76 мс) совпадает со значением, рассчитанным по формуле  $\tau = k \sqrt[6]{Q} \sqrt{R}$  ( $Q$  — масса заряда ВВ,  $R$  — расстояние от центра заряда ВВ до точки наблюдения) при значении коэффициента  $k = 0.85$ , то на расстоянии  $62.5R/R_0$  совпадение расчетного времени (17.56 мкс) с экспериментальным может быть получено уже только при  $k = 1.04$ .

Важно отметить, что в эксперименте не наблюдается падения импульса с увеличением расстояния (вплоть до значения  $62.5R/R_0$ ), как это предсказывает зависимость из [5]  $i = 200 \frac{\sqrt[3]{m^2}}{r}$  ( $m$  — масса заряда ВВ,  $r$  — расстояние от центра заряда ВВ до точки наблюдения), при этом изменение давления во времени весьма удовлетворительно описывается соотношением  $\Delta p = \Delta p_{\max}(1 - t/\tau) \exp(-at/\tau)$  [5].

Приведенные данные свидетельствуют в пользу того, что при детонации взрывчатых смесей, состоящих из компонентов различной чувствительности, формирование воздушной УВ должно происходить поэтапно, а следова-

тельно, зона ее формирования должна быть больше, чем для индивидуальных ВВ. Так, если для ТНТ зону ближнего действия принято ограничивать расстоянием  $(15 \div 20)R/R_0$ , то для состава № 1 она никак не меньше  $70R/R_0$ .

Интересно проследить, как меняется радиус ближней зоны с увеличением доли высокочувствительных компонентов (составы № 2–4). Данные по этим смесевым составам менее представительны, однако, на наш взгляд, их достаточно для того, чтобы судить о тенденциях эволюции воздушной УВ. Зависимости давления воздушной УВ от безразмерного расстояния для малых зарядов состава на «активном» связующем № 2 и нитроглицеринсодержащих составов № 3 и № 4 (диаметр образцов 90 мм, критические диаметры соответственно 18 и 18.5 мм) представлены соответственно на кривых 5–7 рис. 1. В ближней зоне ТЭ этих составов хотя и ниже, чем у тротила, но существенно выше, чем у состава № 1. Об этом свидетельствуют данные воздушных и наземных подрывов состава № 2. Так, например, на расстоянии  $36R/R_0$ , что является весьма значительным удалением от центра взрыва, ТЭ для состава № 2 составляет 0.79, тогда как для состава № 1 — 0.71. С увеличением расстояния до центра взрыва ТЭ также растет, достигая на расстоянии  $70R/R_0$  значения 1.1. Применение стеклопластиковой оболочки для 90-миллиметровых зарядов состава № 2 дает увеличение ТЭ на этом же расстоянии до  $1.75 \div 1.8$ . Аналогичный результат наблюдается при увеличении диаметра зарядов до 120 мм. При наземных подрывах компактных зарядов массой  $30 \div 50$  кг в дальней зоне (начиная с  $70R/R_0$ ) зафиксировано значение ТЭ, равное  $1.8 \div 1.9$ , которое не изменяется с изменением массы заряда. Аналогично изменяется ТЭ состава № 4 при увеличении диаметра заряда, как это видно из рис. 2.

При изучении состава № 4 подрывались заряды массой 1.7 и 57 кг в наземных условиях. Данные по подрыву малых зарядов представлены кривой 7 на рис. 1, по подрыву больших зарядов — кривой 8. Видно, что зависимость ТЭ от расстояния существенно менее выражена, чем, например, для состава № 1. Другая особенность данного состава заключается в том, что при весьма высоком относительном содержании взрывчатых компонентов (суммарное содержание октогена и нитроглицерина более чем в два раза превышает их долю в соста-

ве № 1) ТЭ сформировавшейся воздушной УВ (на расстоянии примерно  $70R/R_0$ ) не превышает ТЭ состава № 1.

Учитывая сказанное, можно отметить, что с увеличением доли высокочувствительного компонента в смеси при постоянном содержании алюминия скорость нарастания ТЭ на участке до  $(40 \div 55)R/R_0$  увеличивается, однако предельных значений он достигает также примерно к  $70R/R_0$ . Это, возможно, связано со слабой зависимостью скорости окисления алюминия от детонационного давления, которое с повышением доли ВВ возрастает от 6 000 МПа (состав № 1) до  $15\,000 \div 17\,000$  МПа (состав № 4).

Для нитрозфирсодержащих смесевых составов типа угленитов (кривая 9 на рис. 1), в рецептуре которых не содержится металлического горючего, при формировании воздушной УВ также наблюдаются основные особенности, отмеченные для составов, рассмотренных выше. Однако зависимость ТЭ от диаметра (массы) компактного заряда проявляется в более узком диапазоне изменения последнего — до 100 мм (см. рис. 2). Кроме того, формирование воздушной УВ завершается на расстоянии  $\approx (40 \div 50)R/R_0$ . Этот факт косвенно подтверждает соображения о лимитирующей роли реакций окисления алюминия.

При оценках поражающего действия случайных взрывов весьма важны данные о работоспособности, определенные по объему воронки выброса грунта. До настоящего времени не установлено количественного соответствия между ТЭ (по воздушной УВ) и работоспособностью по выбросу. В этой связи был проведен анализ некоторых экспериментальных результатов. Данные о работоспособности по выбросу при подрыве смесевых составов и индивидуальных ВВ представлены в табл. 2.

Параметры выброса определялись объемом. Как и в предыдущих экспериментах, наиболее полная информация получена для состава № 1. Из табл. 2 видно, что с ростом массы заряда увеличивается относительная глубина воронки, удельный же объем выброшенного грунта перестает расти по достижении определенного значения. Для состава № 1, например, эта величина составляет  $\approx 0.1$  м<sup>3</sup>/кг. Наибольший удельный объем выброса имеет место при подрыве зарядов состава № 4, наименьший — в случае подрыва угленитов. При сравнении действия на выброс установлено, что удельный

Таблица 2

Состав	Масса, кг	Видимая глубина воронки, м	Радиус воронки, м	Отношение видимой глубины к радиусу	Объем выброса, м <sup>3</sup>	Удельный объем, м <sup>3</sup> /кг
№ 1	33	0.51	1.6	0.32	1.83	0.055
	41	0.63	1.65	0.38	2.47	0.060
	850	2.5	5.0	0.50	87.5	0.103
	30 000	8.0	15.0	0.44	2520.0	0.084
№ 4	57	1.2	1.4	0.86	3.29	0.058
Гексоген	46	1.28	1.35	0.95	3.27	0.072
Углиниты	20	0.8	0.75	1.07	0.47*	0.024
	40	0.9	1.2	0.75	1.87	0.047
	52	0.7	1.3	0.54	1.53	0.036
	96	1.1	1.8	0.61	4.82	0.050

Примечание. \*Взрыв произведен в грунте с промерзшим на 0.2 м верхним слоем.

объем выброса смесевых ВВ сопоставим с выбросом индивидуальных ВВ, таких как ТНТ, и несколько меньше, чем выброс гексогена. Наконец, следует отметить, что при подрыве индивидуальных ВВ грунт размельчается до более мелких фракций, чем в случае смесевых ВВ.

Для определения сравнительной работоспособности смесевых ВВ при подрыве относительно крупных зарядов изучалось действие взрыва на некоторые строительные конструкции: кирпичные стены, железобетонные стеновые панели, легкие перегородки, переплеты остекления, собственно остекление. В результате можно отметить, что строительные конструкции (фрагменты стен), находившиеся в ближней зоне взрыва, практически не имели повреждений, тогда как остекление было полностью разрушено на расстояниях, более чем в полтора раза превышавших безопасные, рассчитанные по действующим нормативным документам.

Сформулируем основные выводы работы.

1. Химические потери при подрыве смесевых ВВ сильно зависят от размеров заряда, однако указанная зависимость ослабевает с ростом размеров существенно быстрее, чем это наблюдалось М. А. Садовским при подрыве ТНТ. Размеры заряда, при которых потери энергии минимальны, значительно превышают предельные диаметры. Корреляции между названными величинами для различных составов в описываемых экспериментах установить не

удалось.

2. Формирование воздушной УВ от взрывов смесевых ВВ происходит на больших относительных расстояниях от центра взрыва, чем при взрывах ТНТ (зона ближнего действия смесевых ВВ простирается приблизительно до 70 относительных радиусов заряда, в то время как при взрывах ТНТ она ограничена 10 ÷ 15 радиусами). Это выражено тем сильнее, чем меньше доля взрывчатого компонента в составе. В зоне ближнего действия амплитуда давления и импульс воздушной УВ смесевых ВВ существенно меньше аналогичных характеристик ТНТ, однако с ростом расстояния ТЭ смесевых ВВ растет вплоть до достижения некоего предельного значения, которое для ряда смесевых ВВ значительно больше единицы (приближается к двум). Увеличение доли взрывчатого компонента ведет к снижению размеров зоны ближнего действия.

3. При взрыве смесевых ВВ импульс воздушной УВ в ближней зоне, а следовательно, и разрушения, им вызванные, выражены слабее, чем у ТНТ, в пользу этого свидетельствуют значения «головной» части импульса давления фазы сжатия воздушной УВ, ограниченные временем релаксации преграды (например, для стен толщиной два кирпича ≈630 Па·с для состава № 1 и 940 Па·с для ТНТ на расстоянии 30 радиусов при массе заряда 850 кг). Статическое действие воздушной УВ смесевых ВВ в дальней зоне сильнее, чем ТНТ. Таким обра-

зом, оценки размеров зон сильных разрушений по действующим методикам будут давать завышенные значения, в то время как для зон слабых разрушений эти оценки будут занижены.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Садовский М. А.** Механическое действие воздушных ударных волн взрыва по данным экспериментальных исследований // Физика взрыва. М.: Изд-во АН СССР, 1952.
2. **Воскобойников И. М., Афанасенков А. Н.** О некоторых особенностях детонации нитроглицериновых взрывчатых веществ // Взрывное дело. № 55/12. 1964.
3. **Парфенов А. К., Воскобойников И. М., Апин А. Я.** О малой скорости детонации промышленных ВВ // Взрывное дело. № 60/17. 1966.
4. **Анискин А. И.** Детонация смесей взрывчатых веществ с алюминием // Детонация и ударные волны. Черноголовка, 1986.
5. **Физика взрыва** / Под ред. Л. П. Орленко. М.: Физматлит, 2004. Т. 1.

*Поступила в редакцию 31/III 2005 г.*

---