

УДК 662.215.1

Влияние скорости ударника на параметры взрыва образцов из двух типов бризантных взрывчатых веществ

Представлены экспериментальные данные о влиянии скорости ударника на параметры взрыва образцов из двух типов бризантных взрывчатых веществ. Определены минимальные (предельные) скорости ударников, приводящие к инициированию взрывчатого превращения в образцах, и пороговые скорости, приводящие к инициированию детонации. Определен энергетический масштаб реакции в промежуточном диапазоне скоростей удара.

**Г. В. Белов, Ю. Б. Базаров,
С. Н. Екимчев, А. К. Жиёмбетов,
А. В. Кудашов, И. В. Олейников,
А. В. Шишканов, Н. И. Шустова**

Введение

Для оценок последствий аварийного ударного воздействия на взрывчатые вещества (ВВ) и тестирования численных моделей инициирования и развития взрывчатого превращения необходимы экспериментальные данные по предельным условиям инициирования и параметрам реакции в ВВ в зависимости от условий удара.

В работе рассмотрена реакция открытых цилиндрических образцов ($\varnothing 120$ мм, $h = 60$ мм) из пластифицированных НМХ (типа РВХ 9501) и ТАТБ (типа LX 17) на удар стальными сферическими элементами массой 12 г. Целью опытов являлось получение данных по временным и динамическим параметрам взрывного процесса во всем возможном диапазоне интенсивностей воздействия: от условий отказа в инициировании взрывчатого превращения до условий инициирования детонации. Интенсивность воздействия варьировалась в зависимости от скорости удара в диапазоне 40–3900 м/с. В опытах регистрировались: скорость удара, механический импульс от реакции образца (на расстоянии $4R_{ВВ}$), параметры воздушных ударных волн, метательное действие взрывчатого превращения на контактирующую с ВВ пластинку-индикатор, факт образования при ударе высокотемпературных продуктов реакции.

Для образцов из указанных ВВ получены:

- минимальные скорости удара, при которых происходит инициирование реакций взрывчатого превращения;
- энергетический масштаб реакции в зависимости от скорости удара;
- скорости удара, при которых инициируется детонация образцов.

Проведено сравнение полученных в работе экспериментальных результатов по параметрам реакции с известными данными испытаний по схеме «Сюзан-тест» для тех же ВВ.

Постановка опытов

Схема постановки опытов показана на рис. 1.

В опытах использовались стальные ударники (шарики) массой 12 г (в части опытов – массой 25 г). Скорости удара варьировались от 40 до 3919 м/с. До скоростей 1500 м/с разгон осуществлялся метательными устройствами с рабочим газом в виде продуктов детонации, свыше 1500 м/с – легкогазовой установкой [1].

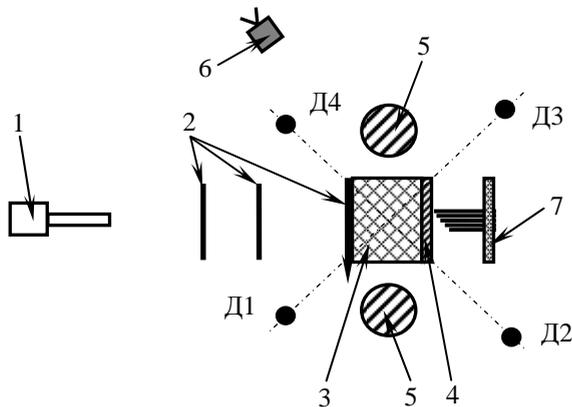


Рис. 1. Схема проведения опытов: 1 – метательное устройство; 2 – электроконтактные датчики фольгового типа; 3 – образец ВВ ($\varnothing 120$ мм; $h = 60$ мм); 4 – пластинка-индикатор (сталь, $\Delta = 2$ мм); 5 – импульсометры; 6 – цифровая видеокамера VS-FAST; Д1–Д4 – датчики давления воздушной ударной волны; 7 – контактный приемник

Регистрировались следующие параметры:

- скорость ударника и момент удара по образцу ВВ с помощью электроконтактных датчиков;
- моменты подлета пластинки-индикатора к базам 2, 7, 12, 22 и 32 мм. Погрешность в определении скорости пластинки-индикатора между базами не превышала 16 %;
- механический импульс, переданный незакрепленным сферическим ($\varnothing 90$ мм) мишеням (импульсометрам), расположенным на расстоянии $4R_{ВВ}$ от центра образца ВВ;
- параметры воздушных ударных волн (ВУВ) с помощью четырех (в части опытов – восьми) пьезоэлектрических датчиков, расположенных на разных базах под углом 45° к оси образца. При доверительной вероятности 0,95 погрешность измерения давления составляла 13 %;
- взаимодействие ударника с образцом ВВ с помощью оптической цифровой видеокамеры VS-FAST в диапазоне длин волн 400–900 нм с частотой $\sim 10^3$ кадр/с.

Для снижения неопределенностей в оценке энерговыделения от реакции ВВ по параметрам ВУВ (связанных с баллистическими эффектами, наличием окружающего образец оборудования [2], особенностями реакции образца [3]) проводились фоновые опыты с «инертными» образцами и образцами из ПСТ1, инициированными зарядом из более мощного взрывчатого состава. В качестве оценочного значения энерговыделения принимался диапазон от минимального до максимального значения по всем датчикам.

Результаты экспериментов

Образцы из взрывчатого состава типа PBX 9501 [4]

При скоростях ударников более 1330 ± 34 м/с (масса 12 г) и 1095 ± 18 м/с (масса 25 г) характерные времена взрыва (время от момента удара до момента смещения пластинки-индикатора на 2 мм) близки к временам, реализующимся при инициировании детонации образца ВВ на поверхности удара. Задержка на развитие детонации не превышала 2–2,7 мкс. Скорости движения пластинок-индикаторов свидетельствуют о высоких действующих давлениях ~ 120 кбар (для базы полета до 4,5 мм). Такие параметры характерны для режима высокоскоростной детонации [5].

При скоростях удара 52–1309 м/с характерные времена взрыва в 4,4–16,2 раза больше, чем при детонации образца, а скорости метания пластинки-индикатора на базе 4,5 мм в 4,3–16,2 раза меньше. Действующее на пластинку-индикатор давление $\sim 0,5$ –6,5 кбар (для базы до 4,5 мм). Снижение скоростей движения пластинок-индикаторов по сравнению со случаем инициирования детонации (в 2,5–7,6 раз) сохраняется и на больших базах измерения [4]. Такие параметры характерны для низкоскоростных режимов взрывчатого превращения [5].

При скоростях удара менее 50 м/с на поверхности образца ВВ регистрировались лишь кратеры глубиной 0,5–3,6 мм. Признаки химической реакции в образце (светящиеся разогретые газы) отсутствовали. Импульсометры оставались в исходном положении.

На рис. 2 показана зависимость скорости движения пластинки-индикатора на базе 4,5 мм от скорости удара, демонстрирующая резкое (пороговое) изменение параметров взрыва при скоростях удара 1330 и 50 м/с.

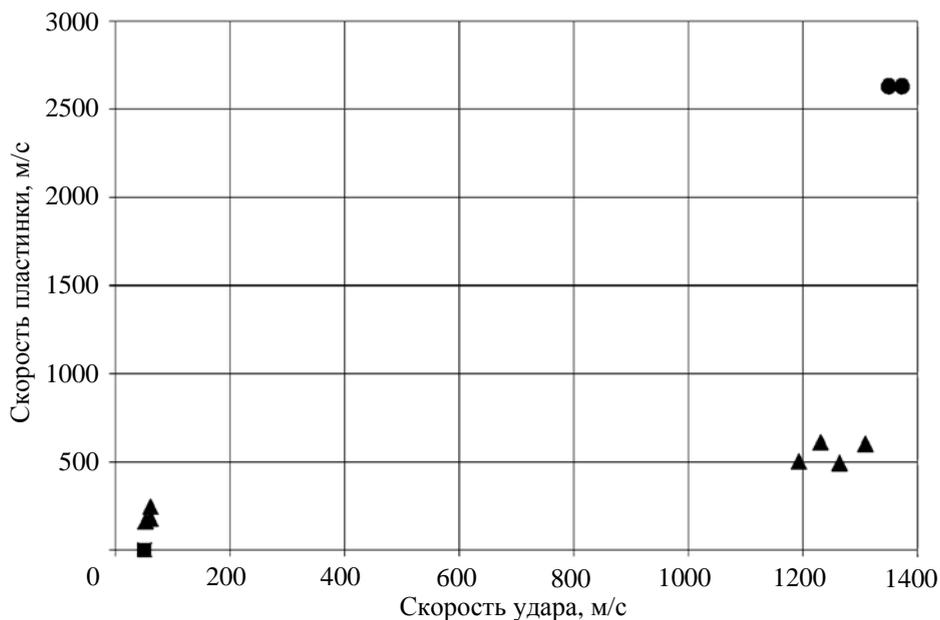


Рис. 2. Зависимость скорости движения пластинки-индикатора на базе 4,5 мм от скорости удара: ▲ – взрывчатое превращение; ● – детонация; ■ – отсутствие взрывчатого превращения

Результаты регистрации импульса взрыва представлены на рис. 3 вместе с данными для трех рассматриваемых ВВ (комментарии для образцов из взрывчатого состава типа PBX 9502 представлены ниже). Как видно из рисунка, для образцов из взрывчатого состава типа PBX 9501 вели-

чина регистрируемого импульса становится «значимой» (достигающей ~0,5 от импульса при детонации образца) уже при минимальной скорости удара, вызывающей инициирование взрывчатого превращения (~50 м/с). При возрастании скорости удара вплоть до скорости, вызывающей инициирование детонации, максимальный регистрируемый импульс меняется слабо.

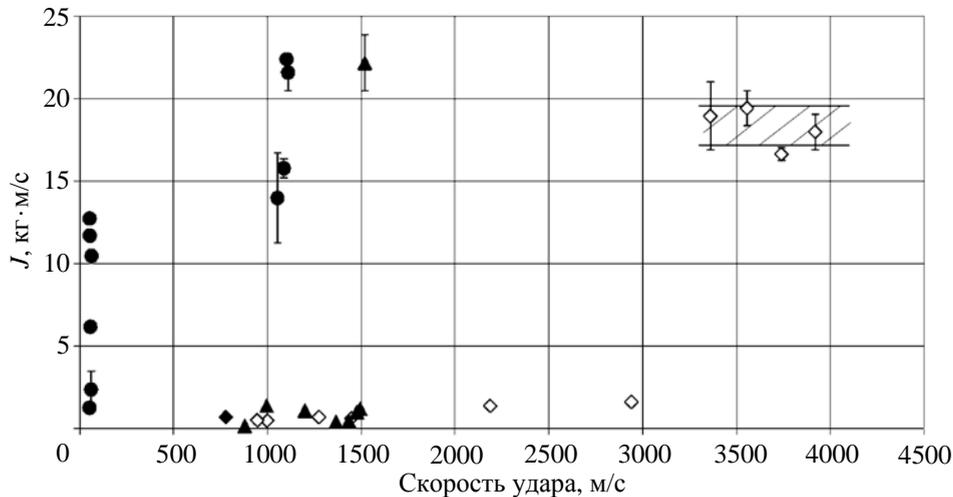


Рис. 3. Зависимость механического импульса от скорости ударника: \diamond – ПСТ1; \bullet – взрывчатый состав типа PBX 9501 (масса 12–25 г); \blacktriangle – ПСТ2

Разница (по скорости удара) между условиями инициирования взрывчатого превращения и условиями инициирования детонации для данного ВВ составляет более 20 раз. (50 м/с и 1300 м/с).

Результаты оценки тротилового эквивалента взрыва будут представлены и прокомментированы ниже, на рис. 7.

Образцы из взрывчатого состава типа PBX9502 (ПСТ1) [6]

При скоростях удара 770–780 м/с происходит разрушение образца без признаков образования газообразных разогретых продуктов реакции. Параметры регистрируемых при этом ВУВ не превышают фоновых значений, полученных в опытах с инертными образцами. На рис. 4,а представлены фрагменты видеорегистрации реакции образца взрывчатого состава в этом случае.

При скоростях удара 910–2940 м/с регистрируется светящееся облако разогретых продуктов реакции, размеры которого растут с увеличением скорости удара. Параметры ВУВ превышают фоновые значения для инертных образцов в несколько раз и увеличиваются со скоростью удара. По этим признакам (появление разогретых газообразных продуктов реакции и формирование в результате их расширения ВУВ) реакцию образца, согласно [7], можно характеризовать как взрывчатое превращение. После опытов оставались фрагменты непрореагировавшего ВВ, что указывает на затухание взрывчатого превращения. На поздних стадиях разрушения образцов в части опытов регистрировалось горение диспергированного материала образца, длящееся десятки миллисекунд. Образования волн сжатия от горения на данной стадии не регистрировалось. На рис. 4,б показаны типичные фрагменты видеорегистрации.

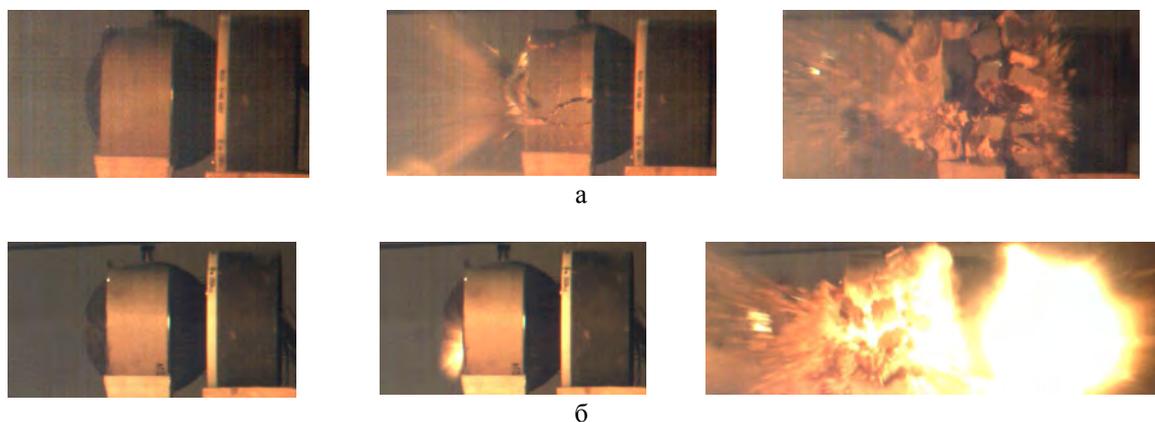


Рис. 4. Фрагменты видеорегистрации реакции в образце ПСТ1: а – скорость ударника 770 м/с, реакция в образце ВВ отсутствует; б – скорость ударника 1272 м/с, инициирование реакции в образце ВВ

При скоростях удара 3360 м/с и более реакция образцов ПСТ1 близка к случаю инициирования их накладным зарядом. Характерные скорости разлета продуктов реакции на базе 2–4 размеров образца составляют ~4 км/с. Однако на расположенных со стороны удара деталях оборудования отмечались следы распыленного непрореагировавшего материала образца. Движение пластинки-индикатора описывают зависимости смещения от времени и скорости движения от смещения на рис. 5 и 6.

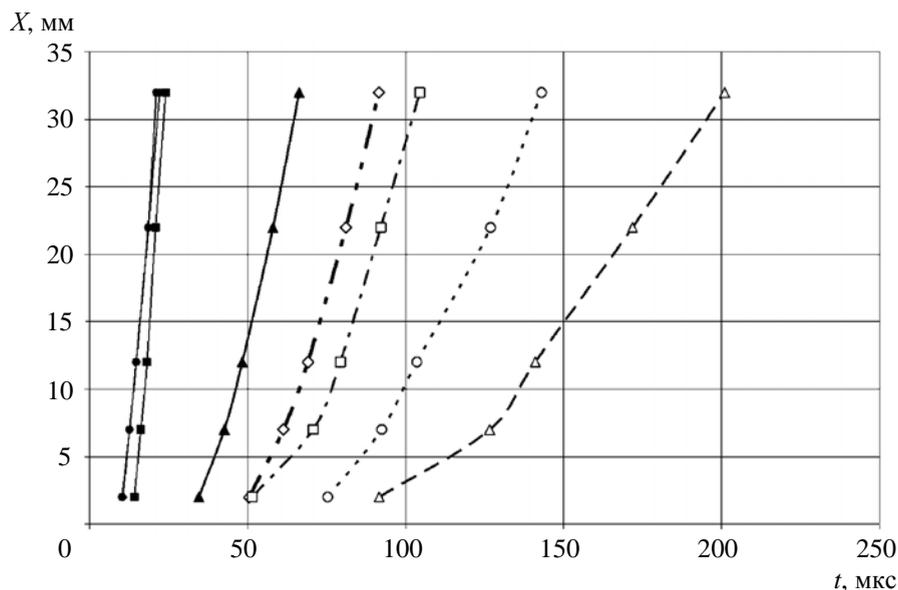


Рис. 5. Зависимость смещения пластинки-индикатора от времени при скорости ударника (м/с):
 ◇ – 1448; ○ – 999; △ – 770; □ – 1272; ▲ – 2187; ■ – опыт № 1 (инициирование электродетонатором);
 ◆ – 3556; ● – 3361

Как видно из рис. 5, начало движения и наклон кривых до скоростей удара 2187 м/с зависят от скорости удара, а при скоростях удара 3361–3919 м/с они практически одинаковы и идентичны положению кривых в опытах, где инициирование образца ВВ осуществляется накладным заря-

дом. При этом на $X-t$ -диаграммах до скоростей удара ~ 1300 м/с можно отметить наличие «излома» на базе 5–10 мм, связанного, по-видимому, с влиянием проникающего ударника на замыкание контактных датчиков. Такая же тенденция наблюдается и на рис. 6: до скоростей удара 2187 м/с максимальные скорости пластинки-индикатора не превышают 1200 м/с и увеличиваются с ростом скорости. При этом ускорение пластинки-индикатора (по крайней мере, до скоростей удара ~ 1300 м/с) связано не только с реакцией ВВ, но и с проникающим действием ударника, о чем свидетельствуют практически постоянные (в пределах погрешностей) скорости на базах более 10 мм и найденные после опытов пластинки с отверстиями, пробитыми ударником. При скоростях удара 3360–3920 м/с скорости пластинок-индикаторов на всех базах полета совпадают с полученными при инициировании накладным зарядом с точностью $\sim 7\%$ (отдельные точки с большими отклонениями вызваны особенностями регистрации движения выпуклой поверхности пластинки-индикатора с неопределенной координатой вершины и укладываются в указанную выше максимальную погрешность $\sim 16\%$). Таким образом, динамика движения пластинки-индикатора свидетельствует о том, что при скоростях удара 3360–3920 м/с реакция образца ПСТ1 близка к случаю инициирования детонации накладным зарядом. Задержки на развитие детонации не превышают 2–3 мкс.

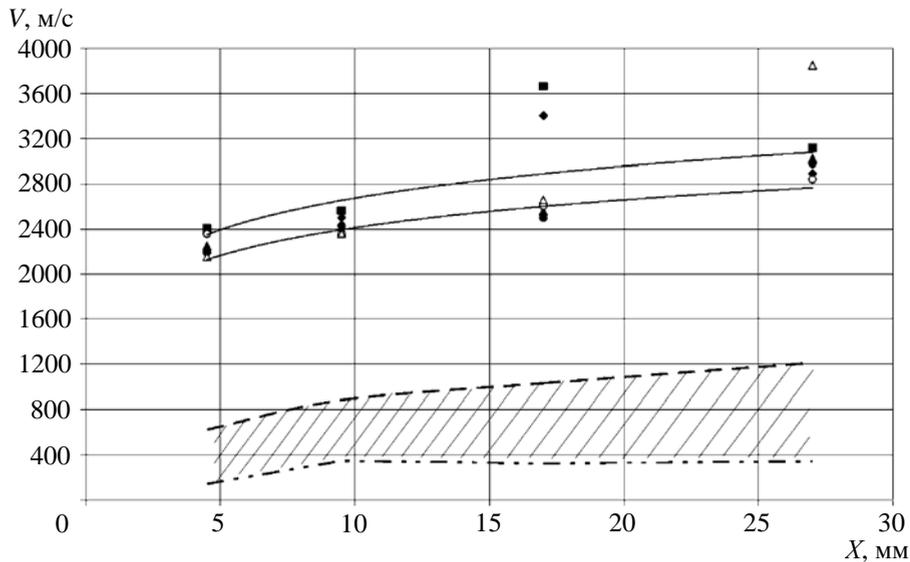


Рис. 6. Зависимость скорости движения пластинки-индикатора от смещения при скорости ударника (м/с): --- – 770; – · – 2187; ● – 3721; ▲ – 3919; ◆ – опыт № 1 (иницирование электродетонатором); ■ – опыт № 2 (иницирование электродетонатором); ○ – 3656; △ – 3361

Экспериментальные данные по зависимости механического импульса от скорости удара представлены на рис. 3. Как видно из графика, при скоростях удара 946–2940 м/с механический импульс слабо растет с увеличением скорости и не превышает 10 % от импульса, зарегистрированного при инициировании детонации образца накладным зарядом. При скоростях удара 3360–3920 м/с механический импульс сопоставим с зарегистрированным при инициировании детонации образца (заштрихованная область). Разница (по скорости удара) между условиями инициирования взрывчатого превращения и условиями инициирования детонации составляет ~ 3 раз.

На рис. 7 представлены результаты оценок тротилового эквивалента взрыва (энерговыделения) по параметрам ВУВ в зависимости от скорости удара и при инициировании детонации об-

разца накладным зарядом. Из-за большой разницы в масштабах величин результаты представлены в виде логарифма энерговыделения. Как видно из графика, при скоростях удара 946–2940 м/с энерговыделение слабо растет с увеличением скорости удара. Энерговыделение составляет 0,01–0,25 г ТНТ и не превышает кинетической энергии ударника (1,3–12,4 г ТНТ). При скоростях удара 3360–3920 м/с значение энерговыделения практически не отличается от зарегистрированного при инициировании детонации образца накладным зарядом (область между сплошными линиями). Пунктирной линией обозначено фоновое значение, полученное в опытах с инертными образцами.

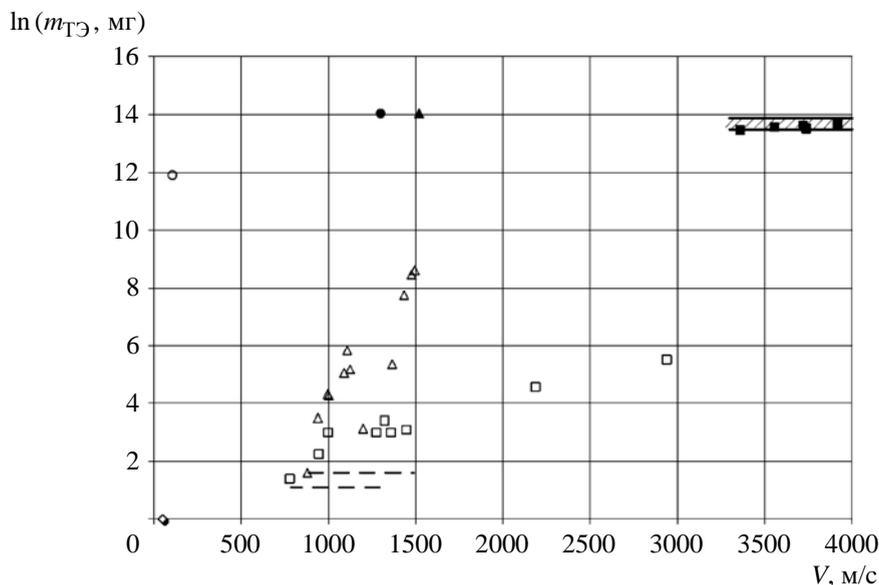


Рис. 7. Зависимость тротилового эквивалента взрыва от скорости удара: □ – ПСТ1 (взрывчатое превращение); ■ – ПСТ1 (детонация); △ – ПСТ2 (взрывчатое превращение); ▲ – ПСТ2 (детонация); ○ – ВВ типа РВХ 9501 (взрывчатое превращение); ● – ВВ типа РВХ 9501 (детонация); ◇ – ВВ типа РВХ 9501 (отсутствие взрывчатого превращения)

Образцы из ВВ типа X-0319 (ПСТ2)

При скоростях удара менее 940–1000 м/с происходит разрушение образца без признаков образования газообразных разогретых продуктов реакции. Результаты видеорегистрации аналогичны рис. 4,а.

При скоростях удара 1000–1495 м/с в образцах ВВ инициируется взрывчатое превращение, о чем свидетельствует образование светящихся высокотемпературных продуктов реакции в зоне удара, сопровождающееся регистрацией ВУВ с параметрами выше фоновых. Результаты видеорегистрации аналогичны рис. 4,б. Интенсивность взрывчатого превращение невелика: характерные «времена взрыва» (время от момента удара до смещения пластинки-индикатора на 2 мм) в 3,3–4,1 раза больше, чем при детонации образца, а скорости метания пластинки-индикатора на базе 4,5 мм в 7,1–8,6 раз меньше, чем при детонации. Средние действующие на пластинку-индикатор давления составляют ~1–2 кбар (на базе до 4,5 мм). Конечные скорости движения пластинки-индикатора в ~3 раза меньше, чем при инициировании детонации образца. При этом нельзя исключать влияния на регистрацию скорости на базах более 10 мм проникающего в образец ударника, на что указывают постоянные и пропорционально увеличивающиеся со скоростью уда-

ра значения скорости пластинки-индикатора на базах более 10 мм, а также наличие отверстий на найденных после опытов пластинках. Взрывчатое превращение в этих условиях локализовано вблизи проникающего ударника и является затухающим, о чем свидетельствуют остатки ВВ на месте испытания. Интенсивность процесса по мере увеличения скорости удара растет. Это проявляется в увеличении с ростом скорости удара размеров и яркости светящегося облака продуктов реакции, масштаба разрушения пластинки-индикатора и окружающей образец измерительной оснастки, регистрируемого импульса и тротилового эквивалента взрыва.

При скорости удара 1520 м/с и выше характерное время взрыва близко к времени, реализующемуся при инициировании детонации образца ВВ в точке удара. Задержка на развитие детонации не превышает 3,4 мкс. Высокая начальная скорость движения пластинки-индикатора (~2,2 км/с) свидетельствует о детонационном режиме взрыва ВВ, подходящего к пластинке. Характерные средние действующие на пластинку-индикатор давления составляют ~90 кбар (на базе полета до 4,5 мм).

Полученные экспериментальные данные иллюстрируют рис. 3, 7, 8.

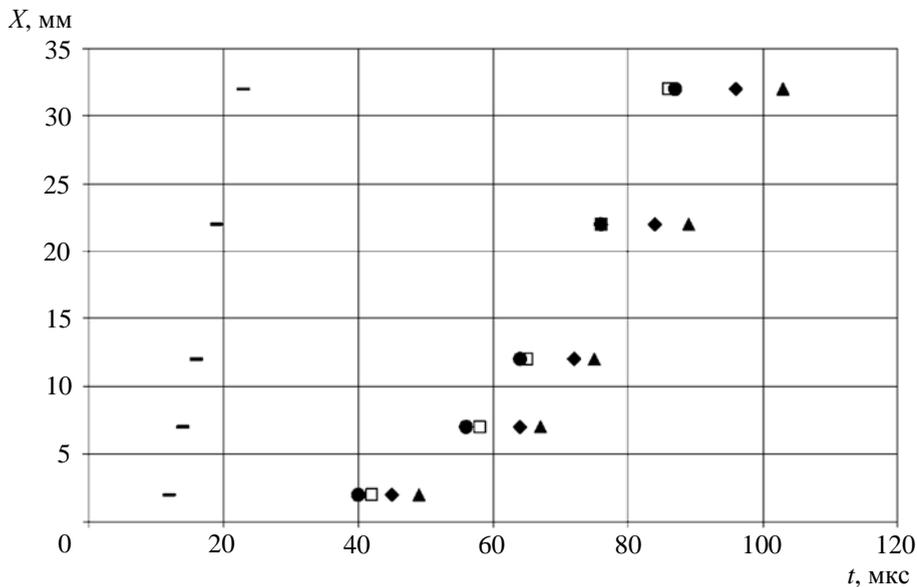


Рис. 8. Зависимость смещения пластинки-индикатора от времени при скорости ударника (м/с):
▲ – 1366; ◆ – 1435; □ – 1477; — – 1520; ● – 1495

Результаты по механическому импульсу в зависимости от скорости удара (см. рис. 3) близки к результатам для образцов из ПСТ1. Однако разница между условиями инициирования взрывчатого превращения и условиями инициирования детонации по скорости удара составляет для этого ВВ не более ~1,5 раз. Таким образом, наличие в ПСТ2 (типа Х-0319) более чувствительного ВВ (НМХ) привело к существенному (по сравнению с ПСТ1) снижению пороговой скорости инициирования детонации (~2 раз), но не сильно сказалось на величине импульса при допороговых скоростях удара.

Качественно аналогичную картину демонстрируют и зависимости тротилового эквивалента взрыва, представленные на рис. 7. Как видно из графика, для образцов ПСТ1 при скоростях удара 946–2940 м/с, а для образцов ПСТ2 – при скоростях 1000–1500 м/с энерговыделение растет с увеличением скорости удара. Энерговыделение для образцов ПСТ1 в этой области составляет 0,01–0,25 г ТНТ и не превышает кинетической энергии ударника (1,3–12,4 г ТНТ), а для образ-

цов из ПСТ2 составляет 0,01–6 г, причем резкое увеличение энерговыделения наблюдается вблизи пороговой скорости удара, вызывающей инициирование детонации (1450–1495 м/с). При скоростях удара 3360–3920 м/с (ПСТ1) и 1520 м/с (ПСТ2) значение энерговыделения не отличается от зарегистрированного при инициировании детонации образца накладным зарядом (заштрихованная область на рис. 7).

Полученное в экспериментах различие в реакции двух типов ВВ связано с тем, что в образцах из ВВ типа РВХ 9501 взрывчатое превращение достаточно быстро (из-за интенсивного энерговыделения) перестает зависеть от источника инициирования и распространяется самостоятельно, охватывая значительную часть материала образца, в то время как в образцах ВВ типа РВХ 9502 (ПСТ1 и ПСТ2) очаг взрывчатого превращения (из-за слабого энерговыделения) локализован вблизи проникающего ударника и не способен к самостоятельному распространению за пределы зоны повышенных давлений и интенсивной пластической деформации. Это различие необходимо учитывать при разработке численных моделей инициирования и развития взрывчатого превращения и анализе последствий ударного воздействия на такие ВВ.

Отметим, что полученные в работе зависимости качественно идентичны результатам испытаний по схеме «Сюзан» и тесту «Стивен» для ВВ типа РВХ 9501 и РВХ 9502 [3, 8]. Однако зависимости параметров взрыва образцов в указанных тестах могут быть получены лишь для области низкоскоростного удара, в то время как описанная в данной работе схема с ударом осколка позволяет получать информацию об изменении параметров реакции образца во всем практически значимом диапазоне изменения скоростей удара – от условий инициирования регистрируемых реакций взрывчатого превращения до условий ударно-волнового инициирования детонации.

Заключение

Представленные в работе зависимости параметров взрыва образцов из ВВ типа РВХ 9501 и РВХ 9502 (ПСТ1 и ПСТ2) от скорости ударника показывают:

1. Минимальные (предельные) скорости стального ударника массой 12 г, приводящие к инициированию реакций взрывчатого превращения, составляют: для образцов из ВВ типа РВХ9501 ~50 м/с, для образцов из ПСТ1 ~ 900–950 м/с, для образцов из ПСТ2 ~ 940–1000 м/с.

2. Пороговые скорости ударника, приводящие к инициированию детонации, составляют: для ВВ типа РВХ9501 1330 ± 34 м/с, для ПСТ1 3150 ± 210 м/с, для ПСТ2 1508 ± 27 м/с.

3. Энергетический масштаб реакции взрывчатого превращения в образцах из ВВ типа РВХ 9501 становится значимым (по сравнению с энергией ударника и его разрушающим действием на образец) уже при предельной скорости удара, в то время как для образцов из ВВ типа РВХ 9502 (ПСТ1 и ПСТ2) он незначителен практически во всем допороговом (по инициированию детонации) диапазоне скоростей удара.

4. Выявленные закономерности в реакции образцов рассмотренных ВВ необходимо учитывать при разработке численных моделей инициирования и развития взрывчатого превращения, а также при анализе последствий ударного воздействия на ВВ.

Список литературы

1. Куликов С. В., Лапичев Н. В., Осеева С. И. и др. Стенд пулеосколочных испытаний // Сб. докл. науч. конф. Волжского регионального центра РАН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения». – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2000. С. 249–255.
2. Гельфанд Б. Е., Сильников М. В. Взрывобезопасность. – С.-Пб.: Астерион, 2006. С. 92–97.
3. Джексон Р., Грин Л., Барлетт Л. и др. Закономерности инициирования и распространения детонации во взрывчатом веществе ТАТБ // Детонация и взрывчатые вещества. – М., 1981. С. 323–342.
4. Белов Г. В., Базаров Ю. Б., Дякин Е. П. и др. Влияние скорости удара на параметры взрыва образцов флегматизированного октогена // Сб. докл. XI Международ. конф. «Харитоновские чтения». – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009. С. 51–55.
5. Беляев А. Ф., Боболев В. К., Коротков А. И. и др. Переход горения конденсированных систем во взрыв. – М.: Наука, 1973.
6. Белов Г. В., Базаров Ю. Б., Дякин Е. П. и др. Зависимость параметров взрывчатого превращения в образцах пластифицированного ТАТБ от скорости ударника // Сб. докл. XIII Международ. конф. «Харитоновские чтения». – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011. С. 14–19.
7. Физика взрыва / Под ред. К. П. Станюковича. – М.: Наука, 1975. С. 9–13.
8. Chidester S. K., Tarver C. M., Garza R. G. Low amplitude impact testing and analysis of pristine and aged solid high explosives // 11th Int. Symposium (International) on Detonation. Snowmass, Colorado, 1998. P. 93.

Influence of Impactor Velocity on Explosion Parameters of Samples Made of Two Types of High Explosives

G. V. Belov, Yu. B. Bazarov, S. N. Yekimchev, A. K. Zhiembetov, A. V. Kudashov,
I. V. Oleynikov, A. V. Shishkanov, N. I. Shustova

The experimental data are presented with regard to an influence of impactor velocity on explosion parameters of samples made of two types of high explosives. Minimal speeds of impactors responsible for initiation of explosive transformation in samples and threshold speeds, which bring about detonation initiation, have been determined. An energetic scale of reaction has been defined in an intermediate impact velocity range.