

УДК 539.89:662.215.2

## О НАГРУЖЕНИИ ПРЕГРАД ВЗРЫВОМ НИЗКОПЛОТНОГО ЛИСТОВОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА

В. К. Голубев, В. А. Медведкин

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, 607190 Саров

В диапазоне плотностей наполнения  $0,1-0,3 \text{ г/см}^3$  определена зависимость скорости детонации низкоплотного листового взрывчатого вещества НИЛ-1 от плотности. Предложено приемлемое для прикладных расчетов уравнение состояния продуктов детонации НИЛ-1 с линейной зависимостью эффективного показателя изэнтропии разгрузки от плотности взрывчатого вещества. Проведены расчетные оценки механического воздействия взрыва НИЛ-1 на преграды из нескольких мощных взрывчатых составов.

Для нагружения криволинейных поверхностей большой площади разработаны соответствующие листовые взрывчатые вещества (ВВ). В зависимости от назначения это либо мощные бризантные листовые пластические ВВ, например ТП-83 [1], либо низкоплотные листовые ВВ типа НИЛ. Если первый класс ВВ, широко применяемый для решения военно-технических проблем, достаточно хорошо исследован, то второй, используемый в основном для промышленных технологических операций, изучен в меньшей степени, и его применению для решения конкретных задач должно предшествовать исследование его свойств.

В связи с конверсией вооружений первостепенную важность приобрели задачи разборки и утилизации разнообразных боеприпасов, как обычных, так и ядерных. При первоначальной отработке технологии разборки выяснилось, что для разрушения прочных клеевых соединений и ряда конструктивных элементов боеприпасов, а также для дробления извлекаемых из боеприпасов крупногабаритных зарядов ВВ целесообразно использовать дистанционные методы импульсного механического нагружения. Наиболее простая и экономичная реализация подобных методов возможна лишь при использовании энергии взрыва. Ограничения по интенсивности нагружения, обусловленные наличием в боеприпасе значительного количества ВВ, а также необходимость нагружения криволинейных поверхностей большой площади привели к выбору в качестве основного нагружающего реагента низкоплотного листового НИЛ-1, удовлетворяющего указанным требованиям. Задачей данной работы является определение детонационных свойств этого ВВ, а также расчетная оценка импульсного механического воздействия взрыва НИЛ-1 на преграды при его использовании для решения прикладных проблем.

Низкоплотное листовое ВВ НИЛ выпускается в виде листов пенополиуретана с находящимися внутри пор кристаллами тэна (НИЛ-1) либо гексогена (НИЛ-2). При изготовлении НИЛ-1 используется порошок тэна с удельной площадью поверхности  $1500-8000 \text{ см}^2/\text{г}$  и массовой долей влаги не более  $0,5\%$ . Подобные ВВ характеризуются плотностью наполнения, т. е. эффективной плотностью находящегося в порах пенополиуретанового каркаса порошка тэна. При плотности наполнения  $\rho_e \approx 0,2 \text{ г/см}^3$  используют листы пенополиуретана толщиной 10 мм, а при большей плотности (вплоть до  $\rho_e = 0,4 \text{ г/см}^3$ ) — листы толщиной 10 и 5 мм. Результаты предварительного изучения детонационной способности обеих марок ВВ показали, что НИЛ-1 детонирует более стабильно в широком диапазоне  $\rho_e$

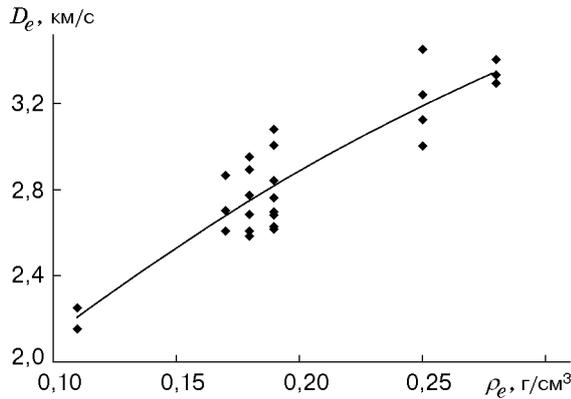


Рис. 1

Рис. 1. Зависимость скорости детонации листовых зарядов НИЛ-1 толщиной 10 мм от плотности

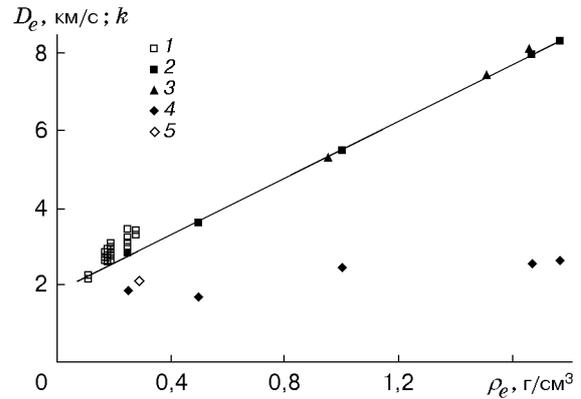


Рис. 2

Рис. 2. Зависимости скорости детонации (1–3) и показателя изэнтропы разгрузки продуктов детонации (4, 5) от плотности:

1, 5 — данные настоящей работы; 2, 4 — [2]; 3 — [3]

( $\rho_e \geq 0,1 \text{ г/см}^3$  при толщине листа 10 мм), поэтому НИЛ-1 был выбран для исследования и проведения работ по разборке и утилизации боеприпасов. Отметим, что процессы детонации листового ВВ и воздействия взрыва на нагружаемую преграду рассматриваются упрощенно, без учета влияния несущего каркаса из пенополиуретана.

Для изучения влияния плотности НИЛ-1 на скорость детонации  $D_e$  использовались электроконтактный и фотохронографический методы регистрации. Контрольные образцы в виде полос шириной не менее 50 мм вырезались из листов толщиной 10 мм. Измерения проводились на базе 100 мм. Результаты представлены на рис. 1. Здесь же показана полученная с использованием метода наименьших квадратов аппроксимирующая эти результаты зависимость

$$D_e = 1,16 + 10,7\rho_e - 10,2\rho_e^2. \quad (1)$$

Качество аппроксимации может быть охарактеризовано значением коэффициента корреляции  $R = 0,914$  и стандартным отклонением точек от полученной зависимости  $s = 0,14 \text{ км/с}$ . При  $\rho_e < 0,11 \text{ г/см}^3$  детонация ВВ становится нестабильной: затрудняется иницирование, отмечаются случаи затухания детонации в полосах либо неполной детонации листов. Отмечается значительный разброс экспериментальных точек, одинаковый для образцов как из разных листов, так и из одного листа. Этот разброс обусловлен неизбежной неоднородностью заполнения пенополиуретанового каркаса порошком тэна.

Зависимость  $D_e(\rho_e)$  для листового НИЛ-1 на рис. 2 сопоставлена с известными результатами для тэна. Приведенная на рис. 2 аппроксимационная зависимость  $D_e = 1,85 + 3,65\rho_e$  построена по пяти точкам из работы [2], лежащим в диапазоне плотностей  $0,25\text{--}1,77 \text{ г/см}^3$ . Полученные для НИЛ-1 результаты в целом хорошо согласуются с данными для пористого тэна, а превышение скорости детонации, по-видимому, обусловлено влиянием на процесс детонации пенополиуретанового каркаса.

В [2] для отмеченных пяти точек приведены значения показателя изэнтропы продуктов детонации тэна  $k$  в точке Чепмена — Жуге. Эти данные также представлены на рис. 2 для сравнения со значением  $k$ , оцененным в работе [4] для листового НИЛ-1 плотностью  $0,29 \text{ г/см}^3$  на основании регистрации давления при взрывном нагружении преграды.

Оценка в указанной работе делалась в предположении, что изэнтропа продуктов детонации имеет вид

$$p = A\rho^k \quad (2)$$

и описывает также процесс сжатия продуктов детонации при отражении детонационной волны от достаточно жесткой преграды. В опыте [4] образец взрывчатого состава ОТК-90 нагружался нормальной детонационной волной в заряде НИЛ-1 толщиной 20 мм, состоящем из двух слоев ВВ плотностью 0,29 г/см<sup>3</sup>. Процесс нагружения регистрировался с помощью манганинового датчика давления, расположенного на поверхности образца. Максимальное давление в нагружающем механическом импульсе составило 2,06 ГПа. В результате совместного решения уравнений для изэнтропы расширения продуктов детонации и ударной адиабаты материала образца для параметра  $k$  получено значение 2,09, которое и показано на рис. 2.

В работе [5] отмечается, что для пористого гексогена зависимость параметра  $k$  от плотности ВВ может быть представлена в виде соотношения

$$k = a + b\rho_e, \quad (3)$$

где  $a = 1,33$ . Предположив, что для тэна также  $a = 1,33$ , и используя значения  $k$ , полученные на основании экспериментальных данных для НИЛ-1 плотностью 0,29 г/см<sup>3</sup> и пористого тэна плотностью 0,25 г/см<sup>3</sup>, получим  $b = 2,41$ . На основании (1), (3) и известных соотношений для детонационной волны можно оценить такие параметры НИЛ-1, как давление, массовая скорость, скорость звука и плотность за фронтом детонационной волны.

Для измерения механического импульса, переданного стальной преграде при ее нагружении скользящей детонацией слоя НИЛ-1 плотностью 0,21 г/см<sup>3</sup>, использовался баллистический маятник. Из двух листов ВВ толщиной 10 мм было вырезано по пять образцов, имеющих размеры 100 × 100 мм, что позволило оценить возможный разброс результатов как в пределах одного листа, так и для разных листов. Удельный механический импульс для двух листов равен (3,65 ± 0,21) и (3,74 ± 0,17) ГПа · мкс.

Численный расчет воздействия продуктов детонации слоя ВВ НИЛ-1 на преграду при скользящем падении детонационной волны проводился с использованием метода характеристик. Краткое описание метода приведено в работе [1], где рассматривалась подобная задача о нагружении преграды скользящей детонацией слоя пластического ВВ ТП-83. Схему нагружения можно представить следующим образом. Плоский детонационный фронт, перпендикулярный поверхности раздела ВВ — преграда, распространяется по слою ВВ со скоростью  $D_e$ . Течение продуктов детонации рассматривается в системе координат, связанной с детонационным фронтом. Согласно условию Чепмена — Жуге их истечение из детонационного фронта происходит со скоростью звука. Дальнейшее сверхзвуковое течение продуктов детонации происходит в зоне взаимодействия двух волн разрежения. При использовании уравнения изэнтропы продуктов детонации в виде (2) уравнения газовой динамики для двумерного стационарного изэнтропического течения принимают следующий вид [6]:

- а)  $Q - \theta = 2\xi$  вдоль характеристики  $C^+$  ( $dy/dx = \operatorname{tg}(\theta + \alpha)$ );
- б)  $Q + \theta = 2\eta$  вдоль характеристики  $C^-$  ( $dy/dx = \operatorname{tg}(\theta - \alpha)$ ),

где  $\xi$  и  $\eta$  сохраняют постоянные значения вдоль индивидуальных характеристик;  $\theta$  — угол течения;  $\alpha$  — угол Маха;  $Q$  определяется выражением

$$Q = \arcsin \frac{1}{M} + \sqrt{\frac{k+1}{k-1}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{k-1}{k+1}} (M^2 - 1).$$

Материал преграды	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$c_0$ , км/с	$\lambda$
ОТК-90	1,86	2,74	2,06
ГТК-70	1,72	2,37	2,12
ОФ-8	1,89	2,52	2,21

Здесь  $M$  — число Маха. Давление определяется формулой

$$p = B \left( \frac{k-1}{2} M^2 + 1 \right)^{-k/(k-1)}, \quad (4)$$

где постоянная  $B$  определяется свойствами ВВ. В качестве граничных условий со стороны преграды используются условия равенства углов течения и давлений на границе продуктов детонации и материала преграды. Эти условия определяются на каждом шаге совместным решением уравнения

$$p = \rho_0(c_0 + \lambda D_e \sin \theta) D_e \sin \theta,$$

где  $c_0$  — объемная скорость звука;  $\lambda$  — коэффициент ударной адиабаты, и уравнения (4), в которое подставляется выражение для  $M$  на соответствующей ( $C^-$ )-характеристике.

Расчеты профиля давления при скользящей детонации НИЛ-1 различной плотности проводились для преград из нескольких мощных взрывчатых составов, параметры ударных адиабат которых приведены в таблице. Значения скоростей детонации НИЛ-1 и показателей изэнтропы расширения продуктов детонации в зависимости от плотности определялись по формулам (1) и (3). Результаты расчетов представлены на рис. 3. Здесь кривые 5, 7 являются предельными в смысле реализации стационарного ударно-волнового режима нагружения соответствующих преград. Дальнейшее уменьшение плотности НИЛ-1 приводит к тому, что расчетное значение скорости ударной волны в преграде становится больше значения скорости детонации нагружающего ВВ. Для третьего состава ОФ-8 зависимости  $p(t)$  располагаются примерно на 1% ниже, чем для состава ОТК-90, а предельный ударно-волновой режим нагружения реализуется при плотности ВВ, равной 0,18 г/см<sup>3</sup>.

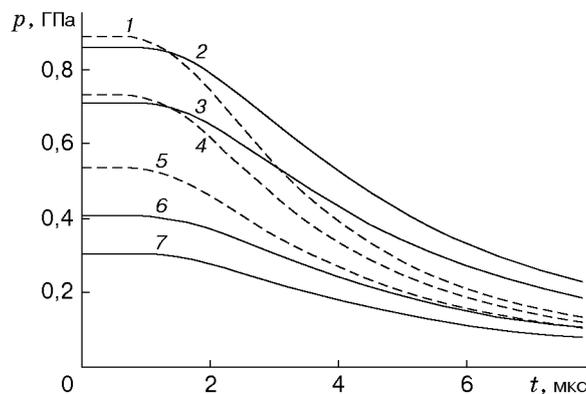


Рис. 3. Профили давления на преградах из составов ГТК-70 (сплошные кривые) и ОТК-90 (штриховые кривые) при их нагружении скользящей детонацией зарядов НИЛ-1 толщиной 10 мм:

1, 2 —  $\rho_e = 0,3$  г/см<sup>3</sup>; 3, 4 —  $\rho_e = 0,26$  г/см<sup>3</sup>; 5 —  $\rho_e = 0,21$  г/см<sup>3</sup>; 6 —  $\rho_e = 0,18$  г/см<sup>3</sup>; 7 —  $\rho_e = 0,15$  г/см<sup>3</sup>

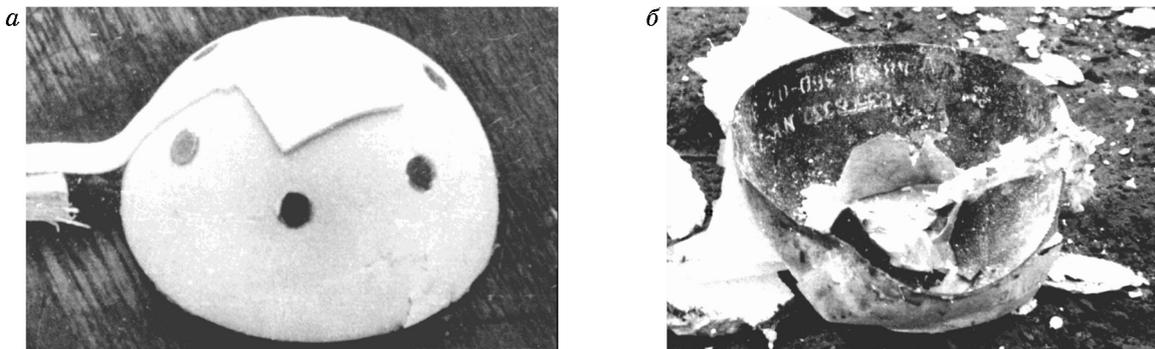


Рис. 4. Нагружение полусферической оболочки из взрывчатого состава с вклеенной в нее оболочкой из карбида бора взрывом заряда НИЛ-1 с размерами  $100 \times 100 \times 5$  мм и плотностью  $0,28 \text{ г/см}^3$ :

*а* — фотография сборки до опыта; *б* — после опыта

На рис. 4 показан пример использования описанного метода нагружения. Оболочка из карбида бора, прочно вклеенная в полусферическую оболочку из взрывчатого состава, легко извлекается для последующей переработки после нагружения последней взрывом небольшого заряда НИЛ-1.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Голубев В. К., Крысанов Ю. А., Новиков С. А., Рябикин А. И. О механическом нагружении преград скользящей детонацией тонкого слоя ВВ // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 4. С. 94–99.
2. Мейдер Ч. Численное моделирование детонации. М.: Мир, 1985.
3. Дремин А. Н., Савров С. Д., Трофимов И. С., Шведов К. К. Детонационные волны в конденсированных средах. М.: Наука, 1970.
4. Голубев В. К., Медведкин В. А., Погорелов А. П., Скоков В. И. К определению предельной стойкости взрывчатого состава на основе октогена при ударно-волновом нагружении // Физика горения и взрыва. В печати.
5. Соловьев В. С., Андреев С. Г., Левантовский А. В. и др. Оптические и рентгенографические исследования детонационных свойств низкоплотных ВВ на основе гексогена // Горение и взрыв: Материалы III Всесоюз. симп. по горению и взрыву, Ленинград, 5–10 июля 1971 г. М.: Наука, 1972. С. 451–454.
6. Мизес Р. Математическая теория течений сжимаемой жидкости. М.: Изд-во иностр. лит., 1961.

*Поступила в редакцию 22/X 1998 г.,  
в окончательном варианте — 24/III 1999 г.*