

УДК 662.217

С.А. Горинов, Б.Н. Кутузов

О НЕУСТОЙЧИВОСТИ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В ЭМУЛЬСИОННОМ ВЗРЫВЧАТОМ ВЕЩЕСТВЕ, СЕНСИБИЛИЗИРОВАННОМ ГАЗОВЫМИ ПОРАМИ

Рассмотрены условия возникновения гофрировочной неустойчивости детонационной волны эмульсионных взрывчатых веществ, которые позволяют оценить практическую надежность детонации скважинных зарядов, выбора средств и способов их инициирования.

Ключевые слова: скорость детонации, неустойчивая детонация, коэффициент полнотропы.

Согласно модели Зельдовича-Неймана-Деринга реакция инициируется одновременно по всему фронту детонационной волны, а вещество ВВ до ударного перехода не разлагается и сохраняет свою природу [1]. Структура детонационной волны в этом случае однородна и стационарна по всей ее площади. Однако экспериментальные исследования показывают, что фактическая структура детонационной волны в гетерогенных ВВ является нестационарной и существенно трехмерной [2–4]. Данное обстоятельство обуславливает возникновение неустойчивых и пульсирующих режимов детонации в смесевых (смесь твердых порошков типа «ВВ+ВВ», «ВВ+ инертное вещество», «аммиачная селитра + жидкое горючее», «ВВ+ вода(раствор селитры)» [5-7], жидких (индивидуальных) ВВ [3] и даже в плотных смесевых сплавах индивидуальных взрывчатых веществ [8].

В работе [9] приведены экспериментальные данные о распространении детонационных процессов в ЭВВ, свидетельствующие о существовании условий, при которых указанный процесс становится неустойчивым.

В настоящей работе дается оценка условий возникновения гофрировочной неустойчивости детонационной волны в ЭВВ, сенсibilизированном газовыми порами, и явлений, обусловленных возникновением указанной неустойчивости. При этом под гофрировочной неустойчивостью детонационной волны понимаем возникновение «ряби» («гофрировки») на поверхности данной волны [10].

В соответствии с представлениями [11] детонационная волна в ЭВВ имеет двухслойную структуру:

- зона сжатия, представленная конденсированным веществом, в расширяющихся из-за горения порах которого происходит разложение ВВ;
- газовая зона, представленная сильноуплотненным газовым телом, в котором происходит догорание ВВ.

В работах [12, 13] получены критерии гофрировочной неустойчивости при распространении ударных волн в произвольных средах. При определении данных критериев использовались только требование эволюционности ударных волн [10] и условия непрерывности потоков плотностей массы, энергии и импульса. Указанные условия непрерывности выполняются и на

детонационной волне [10], а поведение среды в зоне сжатия описывается ударной адиабатой. Следовательно, указанные критерии применимы к описанию гофрировочной неустойчивости зоны сжатия в ЭВВ.

Введем обозначения:

j — плотность потока массы; v , c — скорость распространения детонационной волны относительно движущегося вещества и скорость звука в веществе на границе «зона сжатия — газовая зона»; D^* — скорость распространения детонационной волны.

В соответствии с [10, 12, 13] имеем следующие условия гофрировочной неустойчивости зоны сжатия:

$$\text{при } j^2 \frac{dV_f}{dP_f} < -1 \quad (1)$$

$$\text{или } j^2 \frac{dV_f}{dP_f} > 1 + 2 \frac{v}{c}, \quad (2)$$

на поверхности зоны сжатия возникают экспоненциально возрастающие со временем возмущения. Происходит разрыв детонационной волны на неограниченно возрастающие струи.

При

$$\frac{1 - \frac{v^2}{c^2} - \frac{vD^*}{c^2}}{1 - \frac{v^2}{c^2} + \frac{vD^*}{c^2}} < j^2 \frac{dV_f}{dP_f} < 1 + 2 \frac{v}{c}, \quad (3)$$

на поверхности зоны сжатия возникают устойчивые возмущения (рябь).

Здесь производная $\frac{dV_f}{dP_f}$ берется

вдоль ударной адиабаты в т. (V_f, P_f) . $V_f = V_c$, $P_f = P_c$ см. рис. 1.

При выполнении оценочных расчетов исходим из следующих положений:

• P-V диаграмма ЭВВ, сенсibilизированного газовыми порами, имеет вид, приведенный на рис. 1 [11];

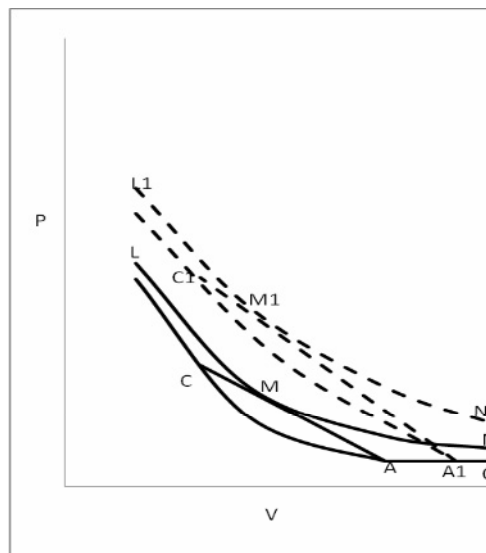


Рис. 1. P-V диаграмма ЭВВ, сенсibilизированного газовыми порами.

• скорость ударной волны равна

$$D_y = A + BW, \quad (4)$$

где A, B — параметры ударной адиабаты в линейной форме; W — массовая скорость за фронтом ударной волны;

• поведение неразложившегося вещества в зоне сжатия удовлетворяет закону Тэта [14]

$$P = \frac{K_*}{n} \left[\left(\frac{V_0}{V} \right)^n - 1 \right] + P_a, \quad (5)$$

где P , P_a — текущее давление в веществе и давление при $V = V_0$ (момент перехода на ударную адиабату (см. рис. 1) $V_0 = V_A$); K_* — модуль объемного сжатия при $V = V_0$; V — удельный объем; n — степенной параметр Тэта; Поведение разложившегося вещества ВВ (взрывных газов), заполняющего расширяющиеся поры в момент их слияния (момент распада зоны сжатия детонационной волны) будет описывать законом Абея [11, 15].

Коэффициент политропы взрывных газов в т. $V = V_*$, где $V_* = V_M$ (см. рис. 1), обозначим через k . Одна из возможных методик определения величины k для ЭВВ представлена в работах [11, 15].

Согласно оценкам в рассматриваемом случае справедливо соотношение

$$P_f \gg P_a. \quad (6)$$

Тогда, на основании (5) определяем

$$\frac{dV_f}{dP_f} = -\frac{V_f}{nP_f + k_*}, \quad (7)$$

$$\text{где } k_* \approx \frac{A^2}{V_0} \quad (8)$$

Т.к. продукты детонации имеют агрегатное состояние близкое к жидкому, то при определении скорости звука на границе «зона сжатия — газовая зона» используем формулу Вили:

$$\frac{1}{c} = \frac{\alpha_\Gamma}{C_\Gamma} + \frac{1 - \alpha_\Gamma}{C_{\text{матр}}} \quad (9)$$

где α_Γ — пористость ЭВВ в зоне сжатия в момент слияния пор ($\alpha_\Gamma \approx 1 - \frac{\pi}{4}$);

C_Γ — скорость звука в продуктах детонации, заполняющих пору, в момент слияния пор (

$$C_\Gamma = \sqrt{k \left(\alpha_* P_f + \frac{RT_H}{\mu} \right)}, \quad \alpha_* - \text{ковольюм}$$

продуктов детонации, R — газовая постоянная, T_H — температура продуктов детонации в зоне сжатия, μ — средний молекулярный вес продуктов детонации); $C_{\text{матр}}$ — скорость звука в матричной эмульсии в зоне сжатия ($C_{\text{матр}} \approx D_* - U$, U — приращение скорости движения продукта взрыва во фронте детонационной волны [16]).

Значение v определяется из условия непрерывности потока массы:

$$j = \frac{v}{V_f} = \frac{D_*}{V_{00}}. \quad (10)$$

$$\text{Следовательно, } v = D_* \frac{V_f}{V_{00}}. \quad (11)$$

Значение V_f определится из условия непрерывности потока массы и импульса. В случае (6) имеем

$$j^2 = \frac{P_f}{V_0 - V_f}, \quad (12)$$

На основании (10)-(12) получаем

$$V_f = V_0 - \frac{V_{00}^2}{D_*^2} P_f. \quad (13)$$

При политропической зависимости (P пропорционально V^{-n}) и выполнении условия (6), в соответствии с [1], имеем

$$n \approx \frac{V_f + V_0}{V_0 - V_f}. \quad (14)$$

Уравнения (1)-(14) в сочетании с методикой определения значений k , V_0 , P_f , P , D_* , представленной в работе [11], позволяют решить задачу о возникновении гофрировочной неустойчивости детонационной волны в ЭВВ, сенсибилизированном газовыми порами.

Однако невыполнимость условий (1) и (2) следует из простых соображений. Действительно, согласно (7)

$$\frac{dV_f}{dP_f} < 0, \text{ следовательно, условие (2) не}$$

выполняется.

Допустим, что выполняется условие (1). Учитывая, что

$$j = \frac{D_*}{V_{00}} = \frac{D_* - W'}{V_*},$$

где W' — массовая скорость в т. V_* ,

а $P_f = \frac{D_* W'}{V_{00}}$, на основании (1), (7),

имеем следующее неравенство:

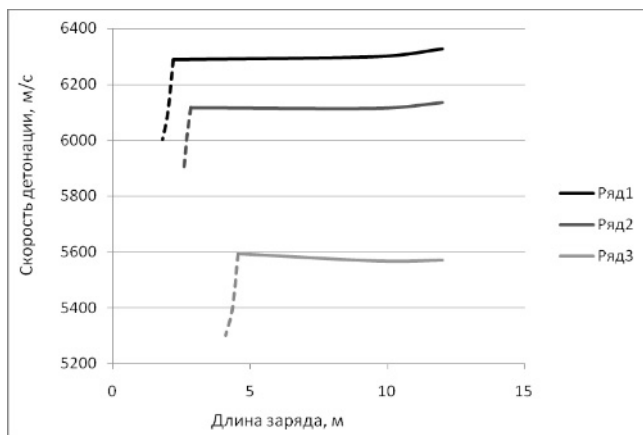


Рис. 2. Зависимость скорости детонации по длине скважинного заряда при нижнем инициировании при различных $k_{вн}$: ряд 1 - $k_{вн}=2,2$; ряд 2 - $k_{вн}=2,0$; ряд 3 - $k_{вн}=1,5$

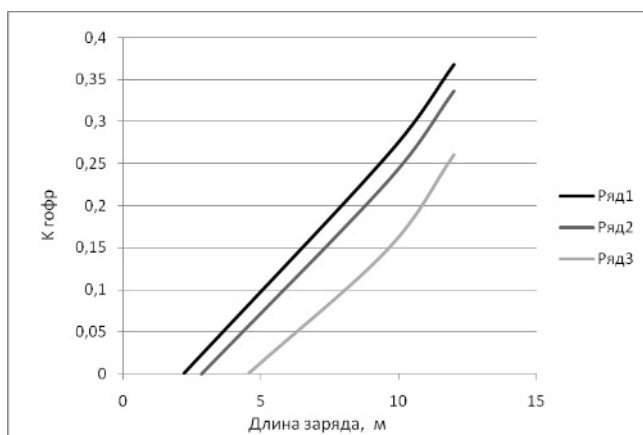


Рис. 3. Зависимость $k_{гофр}$ по длине скважинного заряда при нижнем инициировании при различных $k_{вн}$: ряд 1 - $k_{вн}=2,2$; ряд 2 - $k_{вн}=2,0$; ряд 3 - $k_{вн}=1,5$

$$\left(\frac{D_s}{W} - 1\right) \frac{1}{V_s} > \frac{n}{V_f} \left(1 + \frac{k_s}{nP_f}\right). \quad (15)$$

Согласно [16], $\frac{D_s}{W} - 1 < k$, а из физических соображений понятно, что $n > k$. т.к. $\frac{1}{V_s} < \frac{1}{V_f}$, а $\frac{D_s}{W} - 1 < k < n$, то неравенство (15) не выполняется.

Следовательно, в рассматриваемых ЭВВ разрыва детонационной волны на неограниченно возрастающие струи не происходит.

Однако, как показывают численные исследования, условие (3) выполняется очень часто.

Гофрировка зоны сжатия приводит к тому, что в областях выпуклости детонационной волны (по направлению потока) возникают зоны повышенного давления, обусловленные тем, что:

- продукты детонации, двигаясь вглубь области выпуклости, двигаются в сторону уменьшения радиуса кривизны фронта волны. Продукты взрыва будут находиться в стесненных условиях и их сжатие будет передаваться фронту волны [17—19];

- косым отражением звуковых волн, спонтанно испускаемых гофрированным детонационным фронтом, от поверхности разрыва [10, 12, 13].

Введем в рассмотрение коэффициент пересжатости

$$k_{пер} = 1 + \frac{\Delta Q}{Q_v}, \quad (16)$$

где Q_v — теплота взрыва; ΔQ — количество теплоты, поступившей в зону реакции при рассеянии звуковых волн, отраженных от боковых поверхностей области выпуклости детонационного фронта, а также вследствие дополнительной работы сил увеличенного давления.

Тогда расчет параметров детонации в пересжатом режиме можно вес-

ти на основании [11], если вместо Q_v использовать эффективную теплоту

$$Q_{пер} = k_{пер} Q_v. \quad (17)$$

Процесс детонации в этом случае на P-V-диаграмме будет описываться штриховыми линиями (см. рис. 1).

Введем в рассмотрение коэффициент гофрировки

$$k_{пер} = \frac{\frac{v^2}{c^2} + \frac{vD_*}{c^2} - 1}{1 - \frac{v^2}{c^2} + \frac{vD_*}{c^2}} - \frac{D_*^2}{V_{00}^2} \frac{V_f}{nP_f + k_*}. \quad (18)$$

Из вышесказанного ясно, если $k_{гофф} > 0$, то возникает гофрировочная неустойчивость, если $k_{гофф} < 0$ – нет.

На рис. 2 приведены зависимости скорости детонации в ЭВВ типа «Сибирит-1200» при различных $K_{внеш}$ при нижнем инициировании 12-метрового скважинного заряда (величина глобул эмульсии – 2,5 мкм, радиус газовых пор при внешнем давлении 1 атм – 50 мкм, плотность при атмосферном давлении – 1,07 г/см³). Штриховые линии указывают на «срыв» детонационного процесса.

Если ввести в рассмотрение число $n_* = \frac{D_*}{W'} - 1$ (показатель политропы продуктов взрыва при однополитропном приближении [14, 20]), то на основании (10)–(14) и (18) условие возникновения гофрировочной неустойчивости запишется в виде неравенства

$$k_{гофф} = \frac{\left(1 + \frac{V_f}{V_{00}}\right) \frac{V_f}{V_{00}} \left(\frac{D_*}{c}\right)^2 - 1}{\left(1 - \frac{V_f}{V_{00}}\right) \frac{V_f}{V_{00}} \left(\frac{D_*}{c}\right)^2 + 1} - \frac{V_0 - V_f}{V_0 + V_f} \left(\frac{V_0}{V_f} (n_* + 1) - 1\right) > 0. \quad (19)$$

На рис. 3 приведено изменение $k_{гофф}$. Срыв детонации при переходе в зону $k_{гофф} < 0$ объясняется тем, что пересжатый режим детонации обеспечивается «перекачкой» энергии реакции в область выпуклостей газового тела (по потоку). Это создает высокую энергетическую плотность в данных частях зоны реакции и снижает в других. Поэтому при ликвидации гофрировки давление в оставшихся частях зоны реакции недостаточно для поддержания высокоскоростных режимов. В зоне реакции падает температура, замедляются химические реакции. Это приводит к резкому возрастанию предельного и критического диаметров. В результате наблюдается быстрое снижение скорости детонации вплоть до полной остановки детонационного процесса.

Расчеты показывают, что степень пересжатости напрямую связана с инициирующим воздействием. Более сильный и продолжительный импульс формирует гофрировку с более глубокими выступами (впадинами), в которых способно рассеяться большее количество отраженной энергии.

Данное обстоятельство объясняет сложившуюся в мировой практике тенденцию к применению все более мощных средств инициирования ЭВВ, сенсублизированных газовыми порами.

Полученные результаты позволяют получить полезные в практическом отношении результаты для обеспечения надежности детонации скважинных зарядов, выборе средств и способов их инициирования.

В заключении авторы выражают благодарность д.т.н. Андрееву В.В. за плодотворное обсуждение рассматриваемого вопроса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зельдович Я.Б. // ЖЭТФ, 1940, Т.10, вып. 5. С. 542-568.
2. Трофимов В.С. Обобщение гидродинамической теории детонации на случай турбулентного движения среды // Взрывное дело. Выпуск №103/60. — М.: ЗАО «МВК по взрывному делу при АГН», 2010. — С.3-15.
3. Дремин А.Н. Пульсирующий детонационный фронт // ФГВ, 1983, Т.19, №4. С. 159-169.
4. Атенков А.В., Соловьев В.С. О возможности разложения гетерогенных ВВ во фронте слабой ударной волны // ФГВ, 1987, Т.23, №4. С.113-125
5. Даниленко В.А., Афанасенков А.Н. О спиновой детонации гетерогенных твердых взрывчатых веществ // Письма в ЖТФ, 1978, Т.4, вып.1. С.35-38.
6. Даниленко В.А., Кудинов В.М. Особенности детонации крупногабаритных зарядов смесевых ВВ // ФГВ, 1980, Т.16, №5. С.56-63.
7. Даниленко В.А., Кудинов В.М. Особенности потери устойчивости детонации в удлиненных зарядах // ФГВ, 1983, Т.19, №2. С.101-105.
8. Козак Г.Д., Кондриков Б.Н., Обломский В.Б. Спиновая детонация в твердых веществах // ФГВ, 1989, Т.25, №4. С.86-93.
9. Кукиб Б.Н., Иоффе В.Б., Жученко Е.И., Фролов А.Б., Оверченко М.Н., Лавров В.В., Шведов К.К. Детонационная способность современных промышленных взрывчатых веществ. // 4-ая международная конференция. Физические проблемы разрушения горных пород. 18-22 октября 2004 года, Москва, ИПКОН РАН. С.293-296.
10. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика. М.: Наука, 1988, 736 с.
11. Кутузов Б.Н., Горинов С.А. Физико-технические основы создания эмульсионных и гранулированных ВВ и средств их инициирования. // ГИАБ, 2011, №7. Препринт. С.34-52.
12. Дьяков С.П. Об устойчивости ударных волн. // ЖЭТФ, 1957. — Т. 27. — С. 288—295.
13. Конторович В.М. Отражение и преломление звука на ударных волнах // Акустический журнал, 1959. — Т. 5. — С. 314—323.
14. Баум В.А. Станюкович К.П., Шехтер Б.И. Физика взрыва. М.: Физматгиз, 1959. 800 с.
15. Горинов С.А. Теоретическая оценка детонационных параметров гранэммитов. // ГИАБ, 2010, №8, С.121-130.
16. Горинов С.А. Аппроксимационный метод расчета детонационных параметров низкоплотных аммиачно-селитренных ВВ // ГИАБ, 2010, №10, С.244-256.
17. Зельдович Я.Б. Сходящаяся цилиндрическая детонационная волна // ЖЭТФ, 1959, Т.36. С.782-792.
18. Станюкович К.П. Неустановившиеся движения сплошной среды. М.: Гостехиздат, 1955.
19. Айвазов Б.В., Зельдович Я.Б. Образование пересажтой детонационной волны в сужающейся трубке // ЖЭТФ, 1947, Т.17. С.888-900.
20. Шведов К.К., Дремин А.Н. О параметрах детонации промышленных ВВ и их сравнительной оценке. Взрывное дело, № 76/33. М., Недра, 1976. С.137-150. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Горинов С.А. — кандидат технических наук, ЗАО «Спецхимпром», e-mail: Akaz2006@yandex.ru,
Кутузов Б.Н. — профессор, доктор технических наук, Московский государственный горный университет, e-mail: boriskutuzov@mail.ru.

