

С.А. Горин, И.Ю. Маслов

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ ПРИ ЕЕ РАСПРОСТРАНЕНИИ В ЭВВ, СЕНСИБИЛИЗИРОВАННОМ ГАЗОВЫМИ ПОРАМИ (ПУЗЫРЬКАМИ)

Показано, что при распространении детонационной волны в эмульсионных взрывчатых веществах (ЭВВ), сенсibilизированных газовыми порами, возможны режимы детонации, при которых на поверхности детонационной волны возникают экспоненциально угасающие со временем возмущения, или режимы с устойчивыми возмущениями этой поверхности (состояние нейтральной устойчивости). В первом случае реализуется режим стационарной детонации с плоским фронтом, описываемый одномерной теорией Зельдовича-Нейманна-Деринга. Во втором случае реализуется режим ячеистой детонации. Данный режим позволяет увеличить плотность энергии в зоне реакции (по сравнению с детонационным процессом с плоским детонационным фронтом), что сокращает время прохождения химических реакций и, следовательно, повышает устойчивость детонации. Поэтому данный режим является наиболее предпочтительным при практическом применении ЭВВ. Полученные результаты позволяют получить полезные в практическом отношении решения для обеспечения надежности детонации скважинных зарядов.

Ключевые слова: эмульсионное взрывчатое вещество, устойчивость детонации, ячеистая структура детонационного фронта.

Актуальность работы

Анализ экспериментальных исследований показывает, что при детонации эмульсионных взрывчатых веществ (ЭВВ), сенсibilизированных газовыми порами, независимо от химической природы их окислительной фазы и размеров частиц эмульсии могут возникать переходы на низкоскоростные режимы детонации или даже обрывы детонационного процесса на расстояниях 15–20 и более калибров заряда от места инициации.

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 5. С. 241–254.
© 2017. С.А. Горин, И.Ю. Маслов.

рования. При этом обрывы (или переход на низкоскоростные режимы) детонации происходят в областях, где скорость детонации стабильна и высока (до 5500–6000 м/с) [1].

Неполная детонация заряда ЭВВ влечет снижение безопасности взрывных работ, ухудшение качества взрыва и увеличение негативного воздействия на экологическое состояние окружающей среды. Для выработки практически значимых мер борьбы с указанными особенностями детонации зарядов ЭВВ, необходимо выяснить причину, обуславливающую их появление. Данная работа посвящена вопросу объяснения причины срыва (перехода на более низкоскоростные режимы) детонации в вертикальных (наклонных) скважинных зарядах наливных ЭВВ, сенсibilизированных газовыми порами (пузырьками). Важность рассматриваемого вопроса делает работу актуальной.

Материалы исследований

Явление срыва (перехода на более низкоскоростные режимы) детонации в вертикальных (наклонных) скважинных зарядах наливных ЭВВ, сенсibilизированных газовыми порами (пузырьками) не объясняются ни недостаточной инициирующей способностью промежуточных детонаторов, ни нарушением технологии изготовления ЭВВ или процесса зарядки, ни нарушением измерительных кабелей приборов для замера скорости детонации ЭВВ [1].

Согласно модели детонации Зельдовича-Неймана-Деринга химическая реакция инициируется одновременно по всему фронту детонационной волны, а вещество ВВ до ударного перехода не разлагается и сохраняет свою природу [2–4]. 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 [5–13].

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 селитр)» [7–10], индивидуальных жидких ВВ [6, 11, 13] и даже в плотных смесевых сплавах индивидуальных взрывчатых веществ [12]. Прорыв струй, как в зону реакции, так и вперед детонационного фронта при детонации гранулированных ВВ отмечено М. Куком [5].

В соответствии с [14, 15] полагаем, что для детонационной волны в ЭВВ корректно следующее представление о зоне реакции — зона реакции имеет двухслойную структуру:

1. Головная часть — зона сжатия, представленная конденсированным веществом, в расширяющихся из-за горения порах которого происходит разложение ЭВВ;

2. Газовая часть — зона, представленная сильно уплотненным газовым телом, в котором происходит догорание ЭВВ.

При распространении детонационной волны в ЭВВ возможны следующие проявления неустойчивости во фронте детонационной волны, представленном внешней поверхностью зоны сжатия:

1. На поверхности зоны сжатия возникают экспоненциально возрастающие со временем возмущения, обуславливающие разрыв детонационной волны на неограниченно возрастающие струи.

2. На поверхности зоны сжатия возникают устойчивые возмущения (рябь). Данное состояние называется гофрировочной неустойчивостью детонационной волны.

3. Возмущения, возникающие на поверхности зоны сжатия, являются экспоненциально угасающими со временем.

В работах [16, 17] получены критерии неустойчивостей при распространении ударных волн в произвольных средах. При определении данных критериев использовались только требование эволюционности ударных волн и условия непрерывности потоков плотностей массы, энергии и импульса [18]. Учитывая, что непосредственно к фронту детонационной волны примыкает зона конденсированного неразложившегося вещества, полагаем, что критерии Дьякова-Конторовича [16, 17] применимы к описанию гофрировочной неустойчивости фронта детонационной волны 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 [16–18] имеем следующие условия неустойчивости зоны сжатия:

1. При

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

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.

2. 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) /нейтральная устойчивость по терминологии работы [19].

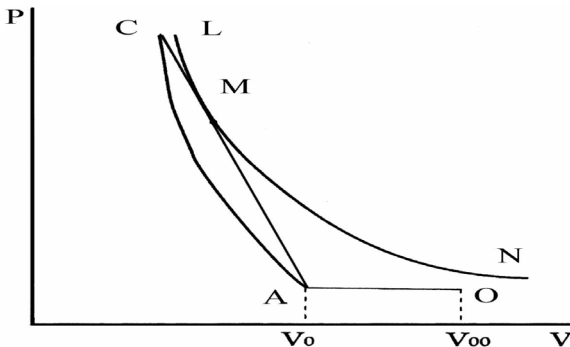
3. При

$$-1 < j^2 \frac{dV_f}{dP_f} < \frac{1 - \frac{v^2}{c^2} - \frac{vD_*}{c^2}}{1 - \frac{v^2}{c^2} + \frac{vD_*}{c^2}} \quad (4)$$

на поверхности зоны сжатия возникают экспоненциально угавающие со временем возмущения, и процесс распространения детонации описывается одномерной теорией Зельдовича-Неймана-Деринга [2–4].

При выполнении оценочных расчетов исходим из следующих положений:

- $P-V$ диаграмма ЭВВ, сенсibilизированного газовыми порами, имеет вид, приведенный на рисунке [15];



$P-V$ диаграмма ЭВВ, сенсibilизированного газовыми порами: V_{00} – начальный удельный объем ВВ (т. O); V_0 – удельный объем в точке начала химических реакций (т. A); V_C, V_M – удельные объемы вещества в т. C и M , соответственно

- скорость ударной волны равна

$$D_y = A + BW, \quad (5)$$

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 [20, 21]

$$P = \frac{k_*}{n} \left[\left(\frac{V_0}{V} \right)^n - 1 \right] + P_a, \quad (6)$$

где P – давление в веществе; k_* – модуль объемного сжатия при $V = V_0$; P_a – давление в веществе в т. $V = V_0$; 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 описываться законом Абея [20–22].

Согласно оценкам в рассматриваемом случае справедливо соотношение

$$P_f \gg P_a. \quad (7)$$

Тогда, на основании (6) определяем

$$\frac{dV_f}{dP_f} = - \frac{V_f}{nP_f + k_*}, \quad (8)$$

где

$$k_* \approx \frac{A^2}{V_0} \quad (9)$$

Невыполнимость условий (1) и (2) следует из простых соображений.

Действительно, согласно (8) $\frac{dV_f}{dP_f} < 0$, следовательно, условие (2) не выполняется.

Допустим, что выполняется условие (1).

Тогда, учитывая, что

$$j = \frac{D_*}{V_{oo}} = \frac{D_* - W'}{V_*}, \quad (10)$$

где W' – массовая скорость в т. V_* , а $P_f = \frac{D_* W'}{V_{oo}}$, на основании

(1), (8) будем иметь следующее неравенство:

$$\left(\frac{D_*}{W'} - 1 \right) \frac{1}{V_*} > \frac{n}{V_f} \left(1 + \frac{k_*}{nP_f} \right). \quad (11)$$

Однако данное неравенство не выполняется.

Действительно, согласно [23]: $\frac{D_*}{W'} - 1 < k$.

Согласно экспериментальным данным [24, 25] $\frac{1}{V_*} < \frac{1}{V_f}$ и $n > k$.

Учитывая, что $\frac{1}{V_*} < \frac{1}{V_f}$, имеем

$$\frac{n}{V_f} \left(1 + \frac{k}{nP_f} \right) > \frac{n}{V_f} > \frac{k}{V_*} > \left(\frac{D_*}{W'} - 1 \right) \frac{1}{V_*}.$$

Доказано, что (11) не выполняется.

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

Реализуются только режимы детонации, когда на поверхности зоны сжатия возникают или устойчивые возмущения (нейтральная устойчивость), или экспоненциально угасающие со временем возмущения. В случае угасающих со временем возмущений будет наблюдаться стационарная детонация с плоским детонационным фронтом. Данный режим детонации описывается теорией Зельдовича-Нейманна-Деринга [2–4].

Данный вывод согласуется с исследованиями [26] и [19, 27].

В работе [26] авторы на основе теоретического анализа устойчивости детонационных волн в конденсированных ВВ на примере литого тротила показали, что в этом случае неограниченно возрастающих деформаций детонационного фронта не происходит.

В работах [19, 27] доказывается, что при распространении ударных волн в вандерваальсовском газе гофрировочная неустойчивость не реализуется, а возможны только абсолютно устойчивые или нейтрально устойчивые режимы распространения данных волн. К числу сред, в которых возможно распространение ударной волны в режиме нейтральной устойчивости, относятся жидкости, находящиеся в области фазового перехода «жидкость-газ» [19]. При прохождении ударной волны через данную среду происходит переход ее (полностью или частично) в газообразное состояние. Во многом подобный процесс происходит при прохождении детонационной волны по ЭВВ, сенсibilизированному газовыми порами (пузырьками), когда под действием ударной волны в «горячих точках» инициируется распад конденсированного вещества ЭВВ на газообразные продукты. Однако у данных процессов есть различие:

- в первом случае среда, испаряясь, поглощает энергию ударной волны;
- во втором — при распаде среды на газы происходит выделение энергии.

Согласно исследованиям [28] при выполнении условия

$$\frac{dV_f}{dP_f} < 0$$

протекание химической реакции за фронтом детонационной волны не влияет на устойчивость этой волны. Устойчивость детонационной волны будет в этом случае определяться устойчивостью ее фронта, представляющего из себя фронт ударной волны, распространяющейся по ВВ. Следовательно, ЭВВ, сенсибилизированные газовыми порами (пузырьками), относятся к средам, в которых возможно распространение ударной волны в режиме нейтральной устойчивости. Однако нейтральная устойчивость может реализовываться в случае, если изохорная теплоемкость вещества превышает $5R$ [19]. В зоне сжатия, являющейся головной частью детонационной волны в ЭВВ, вещество представляет собой смесь неразложившейся эмульсии и продуктов детонации. Наличие конденсированной фазы обуславливает то, что даже минимальное значение изохорной теплоемкости данной смеси, достигаемое в момент соприкосновения сфер горения от смежных «горячих» точек, будет удовлетворять указанному условию $12R > 5R$ (это легко показать на основании работ [29–31]).

В случае возникновения на поверхности детонационного фронта устойчивых по амплитуде возмущений в областях выпуклости детонационной волны (по направлению к зоне реакции) возникают зоны повышенного давления [18, 32]. Это обусловлено тем обстоятельством, что продукты детонации, двигаясь вглубь данной области, будут находиться в стесненных условиях, и их сжатие будет передаваться фронту волны (аналогично случаям, рассмотренным в работах [33, 34]). Кроме этого в данном случае (случай нейтральной устойчивости) будет наблюдаться косое отражение звуковых волн, спонтанно испускаемых детонационным фронтом, от поверхности разрыва [18]. В итоге данные процессы обуславливают, как повышение энергетической плотности в зоне реакции (по сравнению с плоским детонационным фронтом), так и возникновение поперечных ударных волн, приводящих к формированию многофронтного (ячеистого) режима детонации. Данный вывод подтверждается численными

экспериментами, выполненными в работе [35]. Многомерные $2D$ и $3D$ расчеты показали, что при распространении в вязком газе ударной волны с периодическим возмущением ее фронта во фронте «...формируется «ячеистая» структура с конечной по величине амплитудой возмущений, не убывающей и не растущей во времени» [35].

Необходимо отметить, что возникновение данного режима детонации порождает автоколебательные процессы, вызываемые перераспределением тепловой и кинетической энергии взрывных газов в зоне химической реакции ЭВВ. В случаях, когда в кинетическую энергию взрывных газов переходит слишком большое количество внутренней энергии, фронт детонационной волны начинает отрываться от газовой зоны реакции. Однако это одновременно снижает давление во взрывных газах в зоне реакции, что приводит к торможению детонационного фронта. Торможение же приводит к росту теплового давления в газах, которое снова способствует ускорению детонационного фронта и т.д. Рост амплитуды данных пульсаций с неизбежностью приводит к ликвидации рассматриваемого режима детонации.

При разрушении ячеистой структуры фронта ликвидируются поперечные детонации, что приводит к снижению температуры в зоне реакции и замедлению химических процессов. Это обуславливает резкое возрастание критического диаметра. В результате возникают явления перехода детонации на низкоскоростные режимы или даже обрыв детонации.

Необходимо отметить, что возникновение автоколебательных процессов при распространении детонации в порошковых гетерогенных ВВ, содержащих индивидуальное ВВ, и ANFO, а также их роль в устойчивости детонационной волны для указанных гетерогенных ВВ впервые отмечена в работах [7–9].

Однако приведенные рассуждения о влиянии ячеистой структуры фронта детонационной волны на устойчивость ее распространения нуждаются в экспериментальном подтверждении существования этой структуры при детонации ЭВВ. Последнее показано в работах [1, 36, 37].

Дополнительно необходимо отметить, что в практике ведения взрывных работ с использованием наливных ЭВВ, сенсибилизированных газовыми порами (пузырьками), приходится практически постоянно иметь дело с отклонениями от условий однородности ЭВВ, а, следовательно, и стационарности процесса детонации. Поэтому с режимами стационарного распространения детонации исследователи сталкиваются преимущественно

но в условиях полигонных испытаний. В практической деятельности при использовании длинных вертикальных (наклонных) скважинных зарядов ЭВВ важнейшее значение приобретает детонация в режиме нейтральной устойчивости. Данный режим позволяет увеличить плотность энергии в зоне реакции (по сравнению с детонационным процессом с плоским детонационным фронтом), что сокращает время прохождения химических реакций и, следовательно, повышает устойчивость детонации.

Выводы

При детонации ЭВВ, сенсibilизированных газовыми порами, реализуются следующие режимы детонации:

- нейтрально устойчивый режим (на поверхности детонационной волны возникают устойчивые возмущения);
- абсолютно устойчивый режим (возмущения на поверхности детонационной волны экспоненциально угасают во времени).

В случае угасающих со временем возмущений детонационного фронта будет наблюдаться стационарная детонация, описываемая одномерной теорией Зельдовича-Неймана-Деринга.

В случае возникновения на поверхности зоны сжатия устойчивых возмущений (нейтральная устойчивость) формируется ячеистая структура детонационного фронта. Для данного режима характерна более высокая энергетической плотности в зоне реакции по сравнению с плоским детонационным фронтом, что сокращает время прохождения химических реакций и, следовательно, повышает устойчивость детонации. Однако при распространении детонации в направлении увеличения размеров газовых пор (направление «вверх» при нижнем иницировании скважинных зарядов) возможно возникновение диспропорции в балансе полной энергии продуктов взрыва в зоне химической реакции — в кинетическую энергию взрывных газов переходит слишком большое количество внутренней энергии. Фронт ударной волны отрывается от зоны реакции. Одновременно вследствие недостаточности тепловой энергии снижается давление и температура взрывных газов. Это замедляет химические реакции и приводит к резкому увеличению критического диаметра, что обуславливает переход детонации на низкоскоростные режимы или даже обрыв процесса.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gorinov S., Maslov I., Bragin P., Kutuzov B. Peculiarities of detonation of gas sensitized emulsion explosion / Combustion and Explosion (COMBEX-2013), Ramsau, Austria, March 4–8, 2013. — <http://www.combex.org/papers/fUm9d3S4/>
2. Зельдович Я. Б. К теории распространения детонации в газообразных системах // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 1940. — Т. 10. — вып. 5. — С. 542–568.
3. Von Neumann J. Theory of detonation waves (OD-02) // Technical Report, National Defense Research Committee of Scientific Research and Development. 1942. Division B. Section B-1. Serial N 238.
4. Döring W. Über der Detonation verging in Gasen // Ann. Phys. 1943, Bd. 43, N 5, S. 421–436.
5. Кук М. А. Наука о промышленных ВВ. — М.: Недра, 1980. — 453 с.
6. Дремин А. Н., Савров С. Д., Трофимов В. С., Шведов К. К. Детонационные волны в конденсированных средах. — М.: Наука, 1970. — 164 с.
7. Даниленко В. А., Афанасенков А. Н. О спиновой детонации гетерогенных твердых взрывчатых веществ // Письма в Журнал технической физики. — 1978. — Т. 4. — вып. 1. — С. 35–38.
8. Даниленко В. А., Кудинов В. М. Особенности детонации крупногабаритных зарядов смесевых ВВ // Физика горения и взрыва. — 1980. — Т. 16. — № 5. — С. 56–63.
9. Кудинов В. М., Даниленко В. А. О результатах исследования устойчивости и структуры фронта детонационных волн в гетерогенных средах / Всесоюзная конференция «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике» 6–10 сентября 1982 г. — Новосибирск, ИГиЛ СО АН СССР, 1982. — С. 67–68.
10. Даниленко В. А., Кудинов В. М. Особенности потери устойчивости детонации в удлиненных зарядах // Физика горения и взрыва. — 1983. — Т. 19. — № 2. — С. 101–105.
11. Дремин А. Н. Пульсирующий детонационный фронт // Физика горения и взрыва. — 1983. — Т. 19. — № 4. — С. 159–169.
12. Козак Г. Д., Кондриков Б. Н., Обломский В. Б. Спиновая детонация в твердых веществах // Физика горения и взрыва. — 1989. — Т. 25. — № 4. — С. 86–93.
13. Дремин А. Н. Открытия в исследовании детонации молекулярных конденсированных взрывчатых веществ в XX веке // Физика горения и взрыва. — 2000. — Т. 36. — № 6. — С. 31–44.
14. Дерibas А. А., Медведев А. Е., Решетняк, Фомин В. М. Детонация эмульсионных взрывчатых веществ с полыми микросферами // Доклады РАН. — 2003. — Т. 389. — № 6. — С. 747–748.
15. Курузов Б. Н., Горинов С. А. Физико-технические основы создания эмульсионных и гранулированных ВВ и средств их инициирования // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2011. — № 7. Отдельные статьи (специальный выпуск). Эмульсионные ВВ, гранэммиты и ANFO: структура, инициирование, физико-технические основы создания. — С. 34–52.
16. Дьяков С. П. Об устойчивости ударных волн // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 1957. — Т. 27. — С. 288–295.

17. *Конторович В. М.* Отражение и преломление звука на ударных волнах // *Акустический Журнал*. — 1959. — Том 5. — вып. 3. — С. 314–323.
18. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика. — М.: Наука, 1988. — 736 с.
19. *Конюхов А. В., Лихачев А. П., Фортвов В. Е. и др.* Нейтрально устойчивые ударные волны в термодинамически неидеальных средах: теория и вычислительный эксперимент / Тезисы международной конференции по физике высоких плотностей энергии — IX Забобахинские научные чтения, г. Снежинск, 10–14 сентября 2007 г. — Снежинск, 2007. — С. 153.
20. *Баум Ф. А., Станюкович К. П., Шехтер Б. И.* Физика взрыва. — М.: Физматгиз, 1959. — 800 с.
21. *Физика взрыва* / Под ред. Л. П. Орленко. Изд. 3-е, перераб., в 2-х т. Т. 1. — М.: Физматлит, 2002. — 832 с.
22. *Власов О. Е.* Основы теории действия взрыва. — М.: изд. ВИА, 1957. — 408 с.
23. *Горинов С. А.* Аппроксимационный метод расчета детонационных параметров низкоплотных аммиачно-селитренных ВВ // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2010. — № 10. — С. 244–256.
24. *Сильвестров В. В., Юношев А. С., Пластинин А. В., Рафейчик С. И.* Ударная сжимаемость эмульсионной матрицы при давлении до 37 ГПа // *Физика горения и взрыва*. — 2014. — Т. 50. — № 4. — С. 110–116.
25. *Рафейчик С. И.* Экспериментальное и численное исследование параметров детонации эмульсионных взрывчатых веществ с микробаллонами из стекла. Автореф. на соиск. уч. степ. канд. физ.-мат. наук. — Новосибирск, ИГиЛ СО АН РФ, 2014. — 19 с.
26. *Асланов С. К., Волков В. Э.* Устойчивость детонации конденсированных взрывчатых веществ / *Детонация. Материалы IX Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву 19–24 ноября 1989 года*. — Суздаль, 1989. — С. 3–5.
27. *Конюхов А. В., Лихачев А. П., Фортвов В. Е. и др.* Устойчивость и неоднозначное представление ударноволнового разрыва в термодинамически неидеальных средах // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 2009. — Т. 90. — вып. 1. — С. 28–34.
28. *Павлов В. А.* Гофрировочная неустойчивость детонационного фронта // *Вестник СПбГУ*. — 1998. — сер. 4. — вып. 4(№ 25). — С. 87–91.
29. *Горинов С. А., Маслов И. Ю.* Теплофизические свойства несенсибилизированной эмульсионной матрицы — компонента эмульсионных взрывчатых веществ // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2011. — № 12. Отдельные статьи (специальный выпуск). Эмульсионные ВВ, гранэммиты и ANFO: структура, инициирование, физико-технические основы создания. Детонационные свойства эмульсионных ВВ, сенсибилизированных пластиковыми полимикросферами. — С. 17–29.
30. *Cooper J., Leiper A. G., Neilson W. G.* Molecular and microscopic structural effects in the detonation of fluid explosives / *Proc. 12th Intern. Detonation Symp.* — 2002. — P. 733–741.
31. *Turcotte R., Goldthorp S., Badeen C. M., Chan S. K.* Hot-wire ignition of AN-based emulsions / *Propellants, Explos., Pyrotech.* 2008. V. 33. — P. 472–481.

32. Ни А. Л., Сугак С. Г., Фортвов В. Е. Квазиодномерный анализ и численное моделирование устойчивости стационарных ударных волн в средах с произвольным уравнением состояния // Теплофизика высоких температур. — 1986. — Т. 24. — № 3. — С. 564–569.

33. Зельдович Я. Б. Сходящаяся цилиндрическая детонационная волна // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 1959. — Т. 36. — С. 782–792.

34. Айвазов Б. В., Зельдович Я. Б. Образование пересжатой детонационной волны в сужающейся трубке // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 1947. — Т. 17. — С. 888–900.

35. Конюхов А. В., Лихачев А. П., Опарин А. М. и др. Численное исследование неустойчивости ударных волн в термодинамически неидеальных средах // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 2004. — Т. 125. — вып. 4. — С. 927–941.

36. Горинов С. А. Устойчивость детонации скважинного заряда эмульсионного взрывчатого вещества, сенсibilизированного газовыми порами // Горный журнал Казахстана. — 2014. — № 1. — С. 24–27.

37. Горинов С. А. Неустойчивость детонационного фронта в эмульсионном взрывчатом веществе, сенсibilизированном газовыми порами / Материалы XIII международной научно-технической конференции «Современные технологии ведения буровзрывных работ, их экономическая эффективность и техногенная безопасность», 23–27 июня 2014 г., г. Бургас. — Бургас, 2014. — С. 47–55. **ГАЗ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Горинов Сергей Александрович¹ — кандидат технических наук,
e-mail: akaz2006@yandex.ru,

Маслов Илья Юрьевич¹ — кандидат технических наук,
e-mail: ilmaslov@mail.ru,

¹ ООО «Глобал Майнинг Эксплозив-Раша».

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 5, pp. 241–254.

UDC 622.235

S.A. Gorinov, I.Yu. Maslov

ANALYSIS OF STABILITY OF DETONATION WAVE IN EMULSION EXPLOSIVE SENSITIZED BY GAS POCKETS (BUBBLES)

It is shown that when a detonation wave propagates in emulsion explosives (EE) sensitized by gas pockets, it is possible that detonation may cause disturbances on the wave surface, which exponentially die with time or remain stable (neutral stability state).

In the first case, this is the mode of stationary detonation with a plane front described by 1D Zeldovich-von Neumann-Döring model.

However, actual blasting using wet EE sensitized by gas pockets nearly all the time faces a bias from the conditions of EE uniformity and, accordingly, from stationarity of detonation.

The second case mode is cellular detonation. This mode makes it possible to increase energy density in the zone of reaction (as against the detonation with the plane front), which shortens the time of chemical reactions and, consequently, elevates stability of detonation.

For this reason, this mode is most preferable when EE are used. On the other hand, when a detonation wave propagates under this mode in the direction of an increase in the size of gas pockets (bottom-up when charges are initiated from below), a malbalance in the overall energy of explosion products is possible in the zone of chemical reaction: too much quantity of internal energy converts to kinetic energy of explosive gases. The shock wave front gets off the gas zone of reaction. Concurrently, due to insufficient heat energy, the pressure and temperature of explosive gases lower. This decelerates chemical reaction, which results in the jump increase in the critical diameter. As a consequence, the detonation velocity rapidly decreases up to complete termination of the detonation process.

The research findings enable making practically useful decisions toward reliable detonation of borehole charges.

Key words: emulsion explosive, detonation stability, cellular structure of detonation front.

AUTHORS

Gorinov S.A.¹, Candidate of Technical Sciences, e-mail: akaz2006@yandex.ru,

Maslov I.Yu.¹, Candidate of Technical Sciences, e-mail: ilmaslov@mail.ru,

¹ Global Mining Explosive Group, 117036, Moscow, Russia.

REFERENCES

1. Gorinov S., Maslov I., Bragin P., Kutuzov B. Peculiarities of detonation of gas sensitized emulsion explosion. *Combustion and Explosion (COMBEX-2013)*, Ramsau, Austria, March 4–8, 2013. <http://www.combex.org/papers/fUm9d3S4/>

2. Zel'dovich Ya. B. *Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki*. 1940, vol. 10, issue 5, pp. 542–568.

3. Von Neumann J. Theory of detonation waves (OD-02). *Technical Report, National Defense Research Committee of Scientific Research and Development*. 1942. Division B. Section B-1. Serial N 238.

4. Doring W. Uber der Detonation verging in Gasen. *Ann. Phys.* 1943, Bd. 43, no 5, pp. 421–436.

5. Kuk M. A. *Nauka o promyshlennykh VV* (Science about industrial explosives), Moscow, Nedra, 1980, 453 p.

6. Dremin A. N., Savrov S. D., Trofimov V. S., Shvedov K. K. *Detonatsionnye volny v kondensirovannykh sredakh* (Detonation waves in condensed media), Moscow, Nauka, 1970, 164 p.

7. Danilenko V. A., Afanasenkov A. N. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 1978, vol. 4, issue 1, pp. 35–38.

8. Danilenko V. A., Kudinov V. M. *Fizika gorennya i vzryva*. 1980, vol. 16, no 5, pp. 56–63.

9. Kudinov V. M., Danilenko V. A. *Vsesoyuznaya konferentsiya «Lavrent'evskie chteniya po matematike, mekhanike i fizike»* 6–10 sentyabrya 1982 g. (Lavrentiev's Lectures on Mathematics, Mechanics and Physics: All-Union Conference, 6–10 September 1982), Novosibirsk, IGI L SO AN SSSR, 1982, pp. 67–68.

10. Danilenko V. A., Kudinov V. M. *Fizika gorennya i vzryva*. 1983, vol. 19, no 2, pp. 101–105.

11. Dremin A. N. *Fizika gorennya i vzryva*. 1983, vol. 19, no 4, pp. 159–169.

12. Kozak G. D., Kondrikov B. N., Oblomskiy V. B. *Fizika gorennya i vzryva*. 1989, vol. 25, no 4, pp. 86–93.

13. Dremin A. N. *Fizika gorennya i vzryva*. 2000, vol. 36, no 6, pp. 31–44.

14. Deribas A. A., Medvedev A. E., Reshetnyak, Fomin V. M. *Doklady RAN*. 2003, vol. 389, no 6, pp. 747–748.

15. Kutuzov B. N., Gorinov S. A. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2011, no 7. Special edition. Emul'sionnye VV, granemity i ANFO: struktura, initsirovanie, fiziko-tekhnicheskie osnovy sozdaniya, pp. 34–52.

16. D'yakov S.P. *Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki*. 1957, vol. 27, pp. 288–295.
17. Kontorovich V.M. *Akusticheskiy Zhurnal*. 1959, vol. 5, issue 3, pp. 314–323.
18. Landau L. D., Lifshits E. M. *Teoreticheskaya fizika*, vol. VI. Gidrodinamika (Theoretical physics, vol. VI. Hydrodynamics), Moscow, Nauka, 1988, 736 p.
19. Konyukhov A. V., Likhachev A. P., Fortov V. E. *Tezisy mezhdunarodnoy konferentsii po fizike vysokikh plotnostey energii IX Zababakhinskiye nauchnyye chteniya*, g. Snezhinsk, 10–14 sentyabrya 2007 g. (IX Zababakhin's Scientific Lectures: Proceedings of International Conference on Physics of High-Density Energy, Snezhinsk, September 10–14, 2007), Snezhinsk, 2007, pp. 153.
20. Baum F. A., Stanyukovich K. P., Shekhter B. I. *Fizika vzryva* (Physics of explosion), Moscow, Fizmatgiz, 1959, 800 p.
21. *Fizika vzryva*. Pod red. L. P. Orlenko. Izd. 3-e, t. 1 (Physics of explosion. Orlenko L. P. (Ed.), 3rd edition, vol. 1), Moscow, Fizmatlit, 2002, 832 p.
22. Vlasov O. E. *Osnovy teorii deystviya vzryva* (Basics of theory of blast action), Moscow, izd. VIA, 1957, 408 p.
23. Gorinov S.A. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2010, no 10, pp. 244–256.
24. Sil'vestrov V.V., Yunoshev A.S., Plastinin A.V., Rafeychik S.I. *Fizika goreniya i vzryva*. 2014, vol. 50, no 4, pp. 110–116.
25. Rafeychik S.I. *Eksperimental'noe i chislennoe issledovanie parametrov detonatsii emul'sionnykh vzryvchatykh veshchestv s mikroballonami iz stekla* (Experimental and numerical investigation into parameters of detonation of emulsion explosives with glass micro-cells), Candidate's thesis, Novosibirsk, IGIL SO AN RF, 2014, 19 p.
26. Aslanov S. K., Volkov V. E. *Detonatsiya. Materialy IX Vsesoyuznogo simpoziuma po goreniyu i vzryvu*, 19–24 noyabrya 1989 g. (Detonation: Proceedings of IX All-Union Symposium on Combustion and Explosion, 19–24 November 1989), Suzdal, 1989, pp. 3–5.
27. Konyukhov A. V., Likhachev A. P., Fortov V. E. *Pis'ma v Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki*. 2009, vol. 90, issue 1, pp. 28–34.
28. Pavlov V.A. *Vestnik SPbGU*. 1998. ser. 4, issue 4 (no 25), pp. 87–91.
29. Gorinov S.A., Maslov I.Yu. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2011, no 12. Special edition. Emul'sionnye VV, granemity i ANFO: struktura, initsirovanie, fiziko-tekhnicheskie osnovy sozdaniya. Detonatsionnye svoystva emul'sionnykh VV, sensibilizirovannykh plastikovymi polimikrosferami, pp. 17–29.
30. Cooper J., Leiper A. G., Neilson W. G. Molecular and microscopic structural effects in the detonation of fluid explosives. *Proc. 12th Intern. Detonation Symp.* 2002, pp. 733–741.
31. Turcotte R., Goldthorp S., Badeen C. M., Chan S. K. Hot-wire ignition of AN-based emulsions. *Propellants, Explos., Pyrotech.* 2008. V. 33, pp. 472–481.
32. Ni A. L., Sugak S. G., Fortov V. E. *Teplofizika vysokikh temperatur*. 1986, vol. 24, no 3, pp. 564–569.
33. Zel'dovich Ya. B. *Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki*. 1959, vol. 36, pp. 782–792.
34. Ayvazov B. V., Zel'dovich Ya. B. *Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki*. 1947, vol. 17, pp. 888–900.
35. Konyukhov A. V., Likhachev A. P., Oparin A. M. *Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki*. 2004, vol. 125, issue 4, pp. 927–941.
36. Gorinov S. A. *Gornyy zhurnal Kazakhstana*. 2014, no 1, pp. 24–27.
37. Gorinov S.A. *Materialy XIII mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sovremennyye tekhnologii vedeniya burovzryvnykh rabot, ikh ekonomicheskaya effektivnost' i tekhnogennaya bezopasnost'»*, 23–27 iyunya 2014 g., g. Burgas (Proceedings of XIII International Scientific–Technical Conference on Modern Technologies, Economic Efficiency and Industrial Safety of Drilling and Blasting, 23–27 June 2014, Burgas), Burgas, 2014, pp. 47–55.