

кривой, дальше они практически совпадают с ней. В пересжатом режиме точки лежат выше основной зависимости $\langle D \rangle$ (ΔH) почти на всей длине переходной зоны за исключением ее хвостовой части. Следовательно, наиболее стабильная связь параметров $\langle D \rangle$ и ΔH имеет место для стационарных режимов детонации зарядов ВВ.

Таким образом, выполненные экспериментальные исследования позволили выявить закономерности изменения нестационарной скорости детонации, радиальной бризантности и взаимосвязи между этими параметрами в пределах переходной зоны, а также ее размеров для трех типов пористых гетерогенных ВВ, отличающихся широким диапазоном детонационных характеристик, при различных режимах их инициирования. Полученные результаты могут быть использованы при обосновании рациональных конструкций комбинированных скважинных зарядов для дробления крепких и разнопрочных породных массивов, при выборе условий стационарности детонации зарядов ВВ в экспериментальных работах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воробьев В. Д., Перегудов В. В., Марченко А. С. Управление импульсом взрыва скважинных зарядов в скальных породах.— Киев: Наук. думка, 1982.
2. Юхансон К., Персон П. Детонация взрывчатых веществ.— М.: Мир, 1973.
3. Соловьев В. С., Власова Л. И., Андреев С. Г. и др. ФГВ, 1981, 17, 5, 135.
4. Мартынюк В. Ф., Сулимов А. А., Дубовицкий В. Ф. ФГВ, 1981, 17, 4, 136.
5. Соловьев В. С., Аттетков А. В., Бойко М. М. и др. ФГВ, 1986, 22, 4, 88.
6. Физика взрыва/Под ред. К. П. Станюковича.— М.: Наука, 1975.
7. Основы теории и методы взрывного дробления горных пород.— Киев: Наук. думка, 1979.

Поступила в редакцию 11/V 1987

УДК 536.46

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛН РАЗРЕЖЕНИЯ ПРИ ДЕТОНАЦИИ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

Б. Е. Гельфанд, А. А. Борисов, С. А. Цыганов
(Москва)

В связи с анализом последствий аварий, сопровождаемых взрывными процессами в энергоносителе и ударно-волновыми явлениями в окружающей среде, в последние годы появилось много сообщений о параметрах волн давления, излучаемых разнообразными источниками взрыва [1—8]. На этом фоне представляется неудовлетворительным состояние измерений и оценки параметров волн разрежения, наоборотим сопутствующих волне сжатия и сменяющих ее в каждой точке пространства по истечении времени действия зоны повышенного давления. По указанной причине реализуемые методы оценки последствий и масштаба вероятных разрушений только по волне сжатия оказываются недостаточно полными. Без учета фазы разрежения такие подходы оказываются неадекватными типу нагрузки, прикладываемой к окружающим источникам взрыва предметам.

Некоторые измерения параметров волн разрежения при взрывах зарядов конденсированных и газовых объемов ВВ [4, 5] уже сейчас позволяют сделать необходимые дополнительные оценки и сопоставления. При анализе динамики волн разрежения наиболее достоверными следует считать результаты из [4—6], а также полезными некоторые сведения из [2, 7].

С целью устранения возможных ошибок при воспроизведении основных результатов и для достижения как можно большей степени обоб-

щения важнейшие параметры воздушной ударной волны (УВ) и сменяющей ее волны разрежения после детонации газовой сферы удобно представить в виде соотношений истинно безразмерных величин. Давление представим как параметр $p = \Delta p/p_0$, где $\Delta p = p_1 - p_0$, p_1 и p_0 — давления за фронтом волны и перед ней; расстояние в виде $\bar{R} = R(p_0/E)^{1/3}$; E — энергия взрыва. Безразмерный импульс запишем в форме

$$\bar{I} = I a_0 (E p_0^2)^{-1/3}.$$

Здесь $I = \int_{t_1}^{t_2} \Delta p dt$ — размерный импульс; a_0 — скорость звука в невозмущенной среде; t_1 — момент прохождения головы волны разрежения; t_2 — время восстановления давления p_0 . Время находим из выражения $\tau = \tau a_0 (p_0/E)^{1/3}$. Во всех дальнейших построениях ключевых зависимостей принималось $a_0 = 340$ м/с, $p_0 = 0,1$ МПа, т. е. за основу для рассмотрения брали взрыв при нормальных условиях в воздушной среде. Перерасчет на иное начальное давление $p \neq p_0$ и на иную начальную скорость звука $a \neq a_0$ легко производится на основе гипотезы о постоянстве истинно безразмерных параметров \bar{p} , $\bar{\tau}$, \bar{I} .

Для наглядного представления соотношения поражающих факторов волн давления и разрежения и преемственности с предыдущими работами удобно представить параметры обеих фаз волнового процесса на одних и тех же графиках. Перепады давления в волнах сжатия и разрежения обозначим Δp_+ и Δp_- , импульсы давления на фазах сжатия и разрежения — I_+ и I_- , а длительности фаз — τ_+ и τ_- . При определении импульса и перепада давления в волне разрежения в качестве величины давления бралось значение $|\Delta p_-|$.

На рис. 1, 1 показано изменение с расстоянием безразмерной длительности фазы разрежения τ_- , 2 — безразмерная длительность фазы сжатия τ_+ . В отличие от τ_+ τ_- остается практически неизменной на большом интервале расстояний от центра взрыва и намного больше τ_+ . Особо велико различие τ_- и τ_+ в ближней зоне взрыва. Отношение значений $\tau_+/\tau_- = \varphi$ на произвольном расстоянии R от центра сферического газового облака радиусом R_0 в первом приближении по [4, 5] составит

$$\ln \varphi = -3,11 + 1,67 \ln (R/R_0) - 0,47 [\ln (R/R_0)]^2.$$

Соотношение действительно при $1,2 < R/R_0 < 60$. Уместно отметить, что в принятых универсальных безразмерных координатах длительность положительной фазы сжатия в волне от взрыва ВВ при $\bar{R} > 0,8$ также описывается зависимостью 2 на рис. 1. Отмечаемое различие τ_+ для ВВ и τ_+ для детонации газового объема не превышает 1,2—1,4. Очень существенно также и то, что длительность фазы разрежения при детонации объема газа с углеводородно-воздушной смесью такая же, как и при разрыве сосуда высокого давления. Энергия взрыва при детонации газового облака вычисляется как $E = QG$, а при разлете сжатого объема газа $E = (p_{11} - p_0) V_0 / (\gamma - 1)$. Здесь Q — удельная теплота взрыва; G — вес энергоносителя; V_0 — объем сжатого газа; γ — отношение теплоемкостей; p_{11} — давление сжатого газа. С учетом данных из [6] справедлив также вывод о близком совпадении величин τ_- при детонационном превращении и при разлете объема сжатого газа.

На рис. 2, 1 приведены зависимости от расстояния \bar{R} относительных амплитуд давления в УВ при взрыве ВВ, при детонации газового облака (2) и относительной амплитуды волны разрежения при детонации газового облака (3). В соответствии с [4, 5] отношение амплитуд УВ и волн разрежения от детонации газовой сферы при $1,2 < R/R_0 < 60$ составит $\psi = \Delta p_+ / \Delta p_-$, где

$$\ln \psi = 1,79 - 0,3491 \ln (R/R_0) + 0,0354 [\ln R/R_0]^2.$$

На рис. 3 показано соотношение импульсов давления на фазах сжатия и разрежения (I — волна разгрузки при взрыве ВВ; 2 — волна давления при детонации газовой сферы). Можно отметить близость значений I_+ и I_- и одинаковый характер их убывания с расстоянием. Точно также и убывание амплитуды волны разрежения при взрыве ВВ происходит по зависимости [9], близкой по своему абсолютному значению и темпу снижения, как от газового взрыва. Обращает внимание малое различие импульсов на фазах сжатия и разрежения для всех типов взрывных источников: ВВ, разрыва сосуда со сжатым газом, детонации газовой сферы. Универсальность представленных зависимостей проявляется и в том, что и при разрывах сосудов высокого давления образуются волны с импульсами, на фазах сжатия и разрежения совпадающих с приведенными на рис. 3 с точностью до 20—30 %.

Таким образом, зависимости $\bar{\tau} = f_1(\bar{R})$, $\bar{p} = f_2(\bar{R})$, $\bar{I} = f_3(\bar{R})$ оказываются достаточно общими и слабо меняющимися при переходе от одного типа взрывного источника к другому. Отличны друг от друга зависимости $\bar{p} = f_2(\bar{R})$ в ближней зоне взрыва при $\bar{R} < 0,4$. Это обусловлено разницей в уровне давления в продуктах взрыва на границе

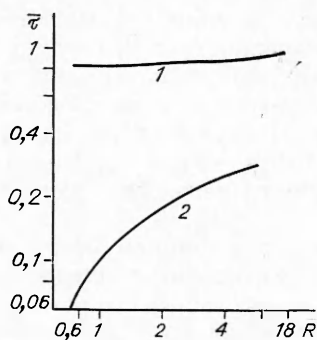


Рис. 1.

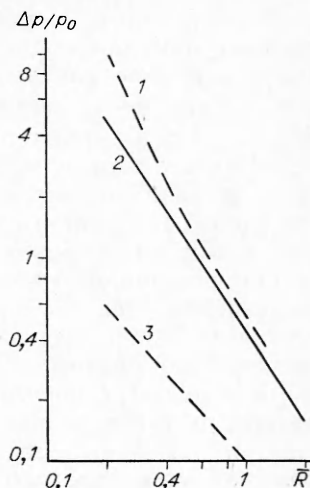


Рис. 2.

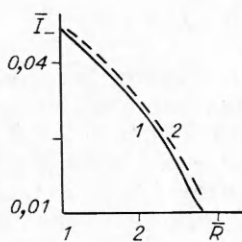


Рис. 3.

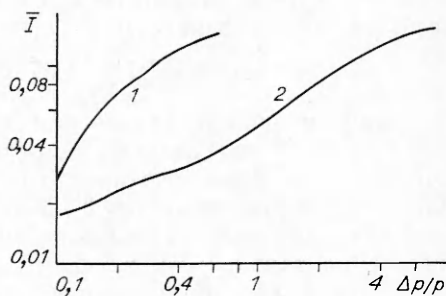


Рис. 4.

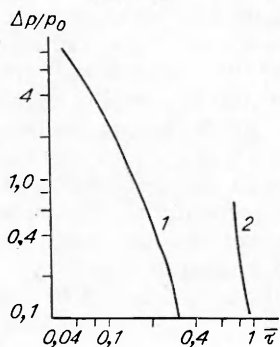


Рис. 5.

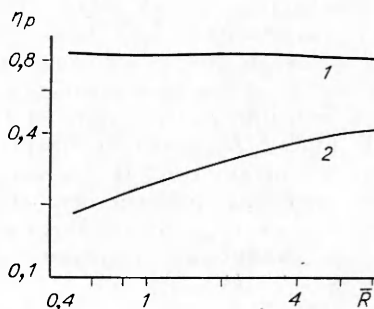


Рис. 6.

раздела воздух + взрывчатая смесь. Построение всех зависимостей в функции одного аргумента позволяет найти универсальные диаграммы ожидаемого воздействия либо в координатах $\bar{\tau} = f_4(\bar{p})$ или $\bar{T} = f_5(R)$. Рис. 4 отражает диаграмму ожидаемого воздействия при детонационном газовом взрыве от волн разрежения (1) и давления (2). Отметим, что в указанном диапазоне \bar{p} кривая 2 с достаточной точностью описывает и ожидаемое воздействие от волны давления при взрыве заряда ВВ. Линия 1 действительна и для взрыва ВВ в еще большей степени. Таким образом, на рис. 4 получена универсальная диаграмма ожидаемого воздействия, по крайней мере, для двух важнейших случаев: детонационного взрыва газового облака и взрыва заряда ВВ. Эта же универсальная диаграмма может быть представлена и в координатах $\bar{p} = f_6(\bar{\tau})$. На рис. 5 показано ожидаемое воздействие от волны разрежения (2) и от волны давления при детонационном газовом взрыве (1). Линия справедлива и для взрыва ВВ.

Диаграммы на рис. 4, 5 показывают, что из-за значительной длительности волны разрежения ожидаемое от нее воздействие при $p < 0,7$ может оказаться для некоторых объектов намного более опасным, чем воздействие УВ. На рис. 6 изображено изменение с расстоянием тротилового эквивалента по давлению η_p для волн разрежения (1) и давления (2). При оценках тротильных эквивалентов по давлению при построении рис. 6 исходили из равенства энергии взрыва газового облака и заряда тротила. Видно, что в отличие от величины η_p на фазе сжатия на фазе разрежения η_p не зависит от расстояния и заметно больше эквивалента по давлению на фазе сжатия в ближней зоне взрыва.

Таким образом, рассмотрение закономерностей ослабления волн разрежения с расстоянием позволяет дополнить картину воздействия взрывных источников и получить иллюстрацию ожидаемых силовых нагрузок более полную, чем при ограничении только фактором волны сжатия. Наиболее заметное качественное различие совокупного воздействия сжатия и разрежения состоит в заметном увеличении временного диапазона, в течение которого взрывной источник оказывает влияние на предметы, окружающие место энерговыделения. В безразмерных переменных зависимости интенсивности и длительности волн разрежения, импульсов на фазах сжатия и разрежения не зависят от типа взрывного источника и являются наиболее универсальными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Strehlow R. A., Baker W. E. Progr. Energy Comb. Sci., 1976, 2, 2760.
2. Lee J. H., Inirao C. M., Chin K. W. et al. Loss Prevention, 1977, 11, 59.
3. Когарко С. М., Адушкин В. В., Лямин А. Г. ФГВ, 1965, 1, 2, 22.
4. Brossard J., Leyet J. C., Desbordes D. et al. // Dynamics of Shock Waves, Explosions and Detonations.— N. Y.: AIAA Inc., 1984.— V. 94.
5. Lannoy A. Analyse des explosions air-hydrocarbure en milieu // Bull. Electr. France. Ser. A.— 1984, 4.
6. Baker W. E., Kulesz J. J., Bicker R. E. et al. NASA CR-3023, 1975.
7. Бейкер У. Е., Кокс П., Уэстайн П. и др. Взрывные явления. Оценка и последствия.— М.: Мир, 1986.— Т. 1.
8. Борисов А. А., Гельфанд Б. Е., Цыганов С. А. ФГВ, 1985, 20, 2, 90.
9. Lewis D. J. Condensed phase explosions and their blast characteristics. Euromech-139, Aberystwith, 1981.

Поступила в редакцию 29/V 1987,
после доработки — 4/VIII 1987