

Рис. 2. Отношение давлений в двух последовательных пиках при увеличении относительных теплотер; Q^* — пороговая величина относительных теплотер.

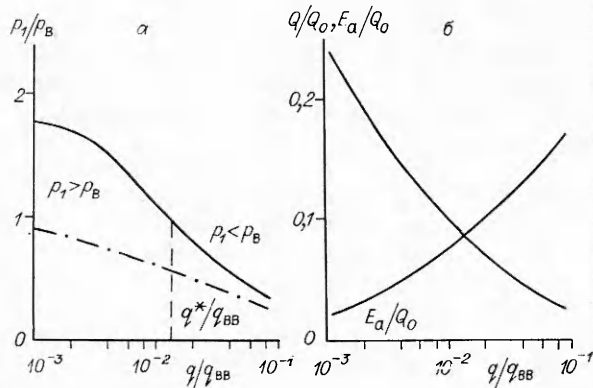


Рис. 3. Влияние увеличения объемной плотности энергии на: эффект превышения давления (а) и относительные величины тепловых и акустических потерь (б); q^* — граничное значение объемной плотности энергии.

скому. Этот факт вполне согласуется с наблюдениями, что описанный эффект не существует при подводных взрывах конденсированных ВВ, а также при расширении первоначально сжатого холодного газа. Экспериментальные данные свидетельствуют также о том, что рост амплитуды давления при первой пульсации тем больше, чем выше относительные теплотер.

Таким образом, модель качественно верно описывает основные особенности подводных взрывов газовых смесей и позволяет оценить границы существования этих особенностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов О. Е., Когарко С. М. ФГВ, 1976, 12, 4, 610.
2. Коул Р. Подводные взрывы. — М.: ИЛ, 1950.
3. Любошиц В. М., Первушин В. Е. Изв. АН СССР. МЖГ, 1974, 2, 176.
4. Когарко С. М., Попов О. Е., Новиков А. С. ФГВ, 1976, 11, 5, 759.
5. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. — М.: Мир, 1975.
6. Handbook of infrared radiation from combustion gases. Sci. and Techn. Inform. Office, NASA, SP-3080, 1973.
7. Leckner V. Comb. Flame, 1972, 19, 1, 33.
8. Каменщиков В. А., Пластинин Ю. А., Николаев В. М. и др. Радиационные свойства газов при высоких температурах. — М.: Машиностроение, 1971.

Поступила в редакцию 16/1 1987

УДК 534.222.2

СКОРОСТЬ ДЕТОНАЦИИ И РАДИАЛЬНАЯ БРИЗАНТНОСТЬ В ПЕРЕХОДНОЙ ЗОНЕ СЛОЖНЫХ ЗАРЯДОВ ВВ

В. В. Гржибовский, В. А. Поплавский

(Киев)

Один из способов управления взрывным воздействием на горные породы — применение сложных скважинных зарядов, состоящих по длине из участков ВВ с различными детонационными характеристиками, согласованными со свойствами пород. Эффект управления достигается за счет различного сочетания и соотношения масс (размеров) этих ВВ по длине скважинного заряда. Этим обеспечивается неравномерное поле

9*

давления в скважине и соответственно неравномерное поле напряжений в породном массиве, что способствует увеличению степени его дробления. В практике горно-взрывного дела такие комбинированные заряды находят применение при скважинной отбойке частично обводненных или разнородных массивов.

В [1] имеются сведения об изменении кусковатости взорванной горной массы в зависимости от количества частей ВВ в сплошном скважинном заряде при различном сочетании их типов. Однако физические закономерности взрывного превращения таких зарядов и их воздействия на среду изучены еще недостаточно. При выходе фронта детонации из одного (активного, инициирующего) ВВ в другое (пассивное, инициируемое) последнему навязывается несвойственный ему режим нестационарной (пересжатой или недосжатой) детонации и часть этого ВВ на некоторой длине разлагается с какой-то переходной скоростью, постепенно выходя на стационарный режим, характерный для конкретных условий. Участок нестационарной детонации называется переходной зоной. Качественный характер изменения скорости детонации в ней для смесевых твердых пористых ВВ известен, однако количественных данных по этому вопросу, в частности по длине переходной зоны l_3 , явно недостаточно.

В [2] на зарядах динамита, состоящих из контактирующих участков с различной скоростью детонации, такой зоны не обнаружено и утверждается, что скорость на контакте изменяется скачком; возможно, это вызвано тем, что замеры выполнены на больших базах (2—4 диаметра заряда) и на значительных расстояниях от контакта. В [3] исследовался процесс передачи детонации от низкоплотных ($\rho_1 = 0,15 \cdot 10^3 \div 0,6 \times 10^3$ кг/м³) зарядов на основе гексогена в контактирующие с ними аналогичные по составу заряды большей ($\rho_2 = 0,6 \cdot 10^3 \div 1,7 \cdot 10^3$ кг/м³) плотности. Полученные зависимости длины переходной зоны от плотности пассивного заряда имеют четкий минимум для $\rho_2 \approx 1,2 \cdot 10^3 \div 1,3 \times 10^3$ кг/м³; величина l_3 тем больше, чем ниже ρ_1 , а следовательно, и давление детонации активного заряда.

В работе [4] исследовалось изменение скорости детонации по длине пассивного заряда из смеси ПХА и ПММА при его инициировании зарядами из смеси ТНТ/NaCl с содержанием ТНТ 40, 50 и 100 %. Установлено, что скорость детонации как при сильном, так и при слабом инициировании стремится сверху или снизу к одинаковому стационарному значению; длина переходной зоны достигала 2,5 диаметров заряда. Экспериментальному изучению механизма возбуждения детонации в низкоплотных смесях порошка гексогена с мипорой при инициировании листовым ВВ с разделяющей медной прокладкой между инициатором и ВВ и без нее посвящена работа [5]. Величина l_3 уменьшается с увеличением плотности ВВ и снижением содержания миноры в ВВ. Она также падает при инициировании ВВ через медную прокладку по сравнению с инициированием при непосредственном контакте. Установлены закономерности изменения показателя адиабаты, волновой и массовой скоростей процесса по длине переходной зоны при указанных схемах инициирования ВВ с $\rho = 0,4 \cdot 10^3$ кг/м³.

Изменение скорости детонации по длине переходной зоны неизбежно сказывается на местном действии взрыва (боковой или радиальной бризантности заряда). Сведений по радиальной бризантности в пределах переходной зоны заряда в литературе не обнаружено.

Цель настоящей работы — экспериментальное определение скорости детонации и радиальной бризантности в пределах переходной зоны зарядов для различных сочетаний активного и пассивного ВВ.

В полигонных условиях испытывали цилиндрические заряды, состоящие по длине из двух равных, непосредственно контактирующих частей следующих пар ВВ: аммонит 6ЖВ и аммонит флегматизированный, аммонит 6ЖВ и флегматизированный гексоген заводского изготовления. Аммонит 6ЖВ флегматизировали добавлением дисперсного хлористого натрия (поваренная соль «Экстра») в пропорции 1:1. Опыты

проводили при инициировании зарядов со стороны слабого (низкоскоростного) ВВ и со стороны сильного (высокоскоростного) ВВ, т. е. в недосжатом и пересжатом режимах. Инициирование зарядов — торцевое, от петли детонирующего шнура, к внешнему концу которого подсоединяли электродетонатор. Заряды патронировали в бумажные оболочки диаметром 0,032 м при плотности 1060—1080 кг/м³. Большинство испытанных зарядов имело длину 0,44 м, массу — 0,4 кг. Заряды взрывали на металлическом основании. Срывов детонационного процесса в опытах не отмечено.

Скорость детонации измеряли хронографическим методом с помощью электронно-счетных частотомеров ЧЗ-54 и ионизационных датчиков по известной методике [5, 6]. Импульсы для запуска и остановки частотомеров подавались ионизационными датчиками из тонкой изолированной проволоки, проходящими сквозь заряд по его диаметру в фиксированных сечениях, расстояние между которыми определяло базу измерения l . Общий ионизационный датчик запуска всех используемых в опытах частотомеров устанавливался в начале переходной зоны — на контакте двух изучаемых ВВ, а датчики остановки — на различных расстояниях (от 0,02 до 0,22 м) от контакта в пределах возможной длины переходной зоны и за ее пределами в инициируемой части заряда. По замеренному времени t и известной длине баз l строили годограф детонационной волны (ДВ) для переходной зоны в виде зависимости $t(l)$. Средняя скорость детонации $\langle D \rangle = \Delta l / \Delta t$, где приращения Δt брались из годографа для малых приращений $\Delta l = 0,02$ м. В пределах указанных значений Δl годограф незначительно отличался от линейного. Полученная величина $\langle D \rangle$ относилась к середине приращения Δl . Проводились также замеры в инициирующей части заряда на участке, отстоящем от контакта двух ВВ на 0,05 м. Это позволило получить годограф и определить скорость инициирующей ДВ, подходящей к контакту двух ВВ.

В настоящих исследованиях радиальная бризантность в области переходной зоны сложных зарядов оценивалась по обжатию призматических брусков из дюралюминия Д16, поперечное сечение которых имело форму квадрата со стороной 0,02 м. Заряд своей образующей устанавливался строго по оси бруска, что позволяло получать непрерывный след от взрыва. Подготовленные сборки взрывали на жестком основании. Метрой бризантности служило уменьшение высоты бруска $\Delta H = H_0 - H$, где H_0 и H — высота бруска до и после взрыва в любом из сечений в области переходной зоны. Параметры зарядов, способ их взрыва в опытах по изучению бризантности были аналогичны опытам по определению скорости детонации ВВ, часть из них выполнена совместно.

Полученные в результате выполненных экспериментов годографы детонационных волн в области переходной зоны исследованных пар ВВ приведены на рис. 1. Нулевые значения t и l на нем соответствуют контакту двух ВВ в заряде, а отрицательные и положительные значения этих величин — соответственно инициирующей и инициируемой частям заряда. Видно, что годограф инициирующей ДВ, подходящей к контакту двух ВВ, прямолинейный, что свидетельствует о стационарном режиме взрывчатого превращения ВВ на данном участке заряда. Средняя скорость стационарной детонации исследованных ВВ составила 3920, 1910 и 5560 м/с соответственно для аммонита 6ЖВ, аммонита, флегматизированного хлористым натрием, и гексогена флегматизированного. Максимальные отклонения отдельных значений скорости детонации от средних для стационарных режимов не превышали 4,5 %, для переходной зоны они достигали 7 %.

Начиная с места контакта ВВ, зависимости $t(l)$ приобретают криволинейный вид, своей выпуклостью они направлены к годографу инициирующей ДВ. С удалением от контакта ВВ годограф ДВ в переходной зоне все больше выполаживается, постепенно вырождаясь в прямую линию, параллельную соответствующему для стационарной детонационной волны инициируемого ВВ и проходящему через начало координат.

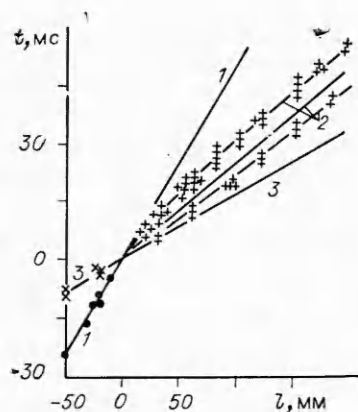


Рис. 1. Годограф детонационных волн при переходе от аммонита, флегматизированного хлористым натрием (1), и гексогена флегматизированного (3) к аммониту 6ЖВ (2).

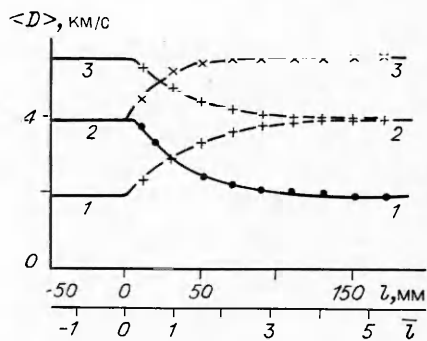


Рис. 2. Изменение скорости детонации в переходной зоне сложных зарядов (обозначения аналогичны рис. 1).

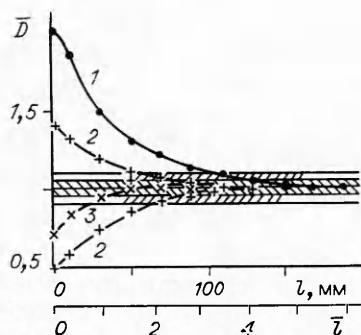


Рис. 3. Профили относительной скорости детонации в переходной зоне заряда.

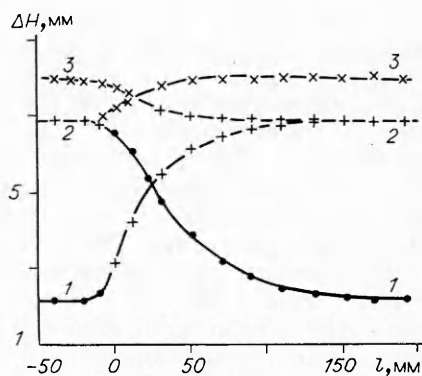


Рис. 4. Изменение показателя радиальной бризантности в пределах переходной зоны сложных зарядов.

Изменение средней (на базе 0,02 м) скорости детонации в переходной зоне исследованных пар ВВ показано на рис. 2. На полученных профилях можно выделить характерные участки. Вблизи контакта двух ВВ на расстоянии до 0,01 м в глубь инициируемого ВВ формируется плато, в пределах которого скорость детонации близка к инициирующей. Заметно, что при переходе к более высокоскоростному ВВ плато менее четко выражено и отличается меньшей протяженностью. За этим участком скорость детонации инициируемого ВВ резко изменяется: в высокоскоростном — возрастает, а в низкоскоростном — падает. С приближением к дальней границе переходной зоны скорость постепенно снижается, плавно стремясь к своему стационарному значению. Величина l_3 определяется длиной участка, заключенного между контактами двух ВВ и точкой, в которой скорость детонации достигает стационарной величины. Для исследованных ВВ при переходе от аммонита 6ЖВ к гексогену флегматизированному $l_3 = 0,07$ м, к аммониту, флегматизированному хлористым натрием, $l_3 = 0,16 \div 0,17$ м; при переходе от гексогена флегматизированного к аммониту 6ЖВ $l_3 = 0,14 \div 0,15$ м; чуть меньше величина переходной зоны при переходе от флегматизированного аммонита к аммониту 6ЖВ — 0,13 м. Относительная длина переходной зоны соответственно равна 2,2; 5,0 \div 5,3; 4,4 \div 4,7 и 4,1 диаметров заряда. В силу очень медленного изменения скорости в дальней (хвостовой) части переходной зоны определение ее общей длины по экспериментальным

зависимостям «страдает» некоторой неопределенностью, поэтому указанные выше значения следует рассматривать в качестве приближенных.

Для удобства анализа полученные зависимости скоростей в переходной зоне представим в относительном виде — в долях от стационарной скорости детонации пассивного ВВ ($D_{c.п}$): $D = \langle D \rangle / D_{c.п}$. Такие зависимости приведены на рис. 3. При $l = 0$ значения D характеризуют относительную стационарную скорость детонации активного заряда $D_{c.а} = D_{c.а} / D_{c.п}$, равную максимальной степени пересжата или недосжата детонационного процесса в начале переходной зоны пассивного ВВ. Кривые, расположенные выше и ниже уровня $D = 1$, отражают соответственно пересжатый и недосжатый режимы инициирования. Как видно, максимальная степень пересжата пассивного ВВ достигала 2,05, а максимальная степень недосжата — 0,49 для пары аммонит 6ЖВ и аммонит, флегматизированный хлористым натрием, при инициировании со стороны сильного и слабого ВВ соответственно. Длина переходной зоны определяется интенсивностью и режимом инициирования пассивного заряда. Чем выше степень пересжата или недосжата, тем больше длина переходной зоны. Для одних и тех же контактирующих ВВ ее длина меньше в недосжатом режиме инициирования по сравнению с пересжатым. Из полученных данных так же просматривается зависимость l_3 от параметра $D_{c.а}$, ее минимум соответствует точке с координатами $\bar{D}_{c.а} = 1,0$ и $l_3 = 0$. Однако для количественного описания этой зависимости экспериментальных данных недостаточно.

На рис. 3 штриховкой ограничена зона, отличающаяся в обе стороны от $D = 1$ на 5 и 10 %. Если принять допустимыми такие отклонения от стационарной скорости детонации, то длина переходной зоны может быть сокращена весьма резко: на 20—40 % в первом случае и 35—70 % во втором.

Результаты измерения радиальной бризантности в области переходной зоны показаны на рис. 4. Различие в обжатии дюралюминиевых брусков очень четко проявляется для пар ВВ, резко отличающихся скоростью детонации: для аммонита 6ЖВ и флегматизированного аммонита, стационарная скорость детонации которых различается более чем в 2 раза, оно составляет 0,0048 м; для аммонита 6ЖВ и гексогена флегматизированного это различие $\leq 0,0011$ м. Сравнение одноименных кривых радиальной бризантности и скорости детонации в переходной зоне показывает, что они качественно подобны. Различие между ними заключается прежде всего в том, что изменение степени обжатия брусков начинается еще до контакта двух ВВ в концевой части активного заряда независимо от направления детонации — от слабого ВВ к сильному, или наоборот.

Связь скорости детонации с величиной радиальной бризантности нелинейная. На рис. 5 экспериментальные точки для стационарных режимов детонации испытанных ВВ изображены светлыми, а для переходной зоны пассивных ВВ — темными символами. С увеличением рассматриваемых параметров в стационарном режиме детонации кривизна основной зависимости (штриховая кривая) растет. В пределах переходной зоны связь между $\langle D \rangle$ и ΔH имеет свои особенности, определяемые режимом инициирования пассивного ВВ. При недосжати вблизи контакта двух ВВ экспериментальные точки ложатся ниже основной

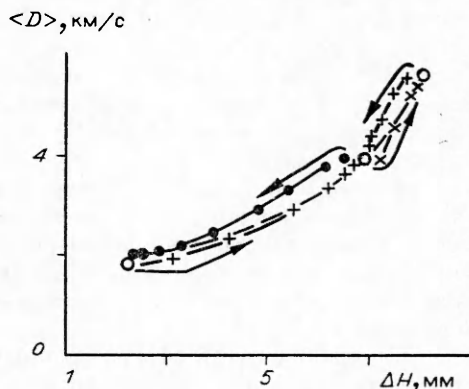


Рис. 5. Взаимосвязь между скоростью детонации ВВ и показателем радиальной бризантности зарядов.

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-