

ЛИТЕРАТУРА

1. Анисичкин В. Ф. Ударно-волновые данные и уравнения состояния конденсированных сред // Физическая механика неоднородных сред.— Новосибирск: ИТГИМ, 1984.— С. 142.
2. Анисичкин В. Ф. Обобщенные ударные адиабаты и нулевые изотермы элементов // ФГВ.— 1979.— 15, № 1.
3. Гиршфельдер Д., Кертисс Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей.— М.: ИЛ, 1961.
4. Филиппов Л. П. Подобие свойств веществ.— М.: Изд-во Моск. ун-та, 1976.
5. Анисичкин В. Ф. Расчет температуры конденсированной среды за фронтом ударной волны // ФГВ.— 1988.— 24, № 1.
6. Воскобойников И. М., Гоголя М. Ф., Долгобородов Ю. А. Температуры ударного сжатия жидких N_2 и Ar // Докл. АН СССР.— 1979.— 246, № 3.— С. 579.
7. Григорьев В. Ф., Кормер С. Б., Михайлова О. А. и др. Ударное сжатие и яркостная температура фронта ударной волны в Ar // Электронная экранировка излучения // ЖЭТФ.— 1985.— 88, вып. 4.— С. 1271.
8. Жарков В. И., Калинин В. А. Уравнения состояния твердых тел при высоких давлениях и температурах.— М.: Наука, 1988.
9. Cowperthwaite M., Shaw R. $C_V(T)$ equation of state for liquids. Calculation of the shock temperature of carbon tetrachloride, nitromethane and water in the 100-kbar region // J. Chem. Phys.— 1970.— 53.— P. 555.
10. Nellis W. J., Ross M., Mitchell A. C. Equation of state of molecular hydrogen and deuterium from shock — wave experiments to 760 kbar // Phys. Rev. A, Rapid Communications, June 7. 1982.
11. Nellis W. T., Mitchell A. C. The temperature of shock-compressed water // J. Chem. Phys.— 1982.— 76.
12. Ross M., McMahan A. K. Condensed xenon at high pressure // Phys. Rev., B21 (1980), 1658.
13. Van Thiel M., Alder B. J. Shock compression of liquid hydrogen // J. Molecular Phys.— 1966.— 10.— P. 427.
14. Мальков И. Ю. Образование ультрадисперсной алмазной фазы углерода в условиях детонации гетерогенных смесевых составов // ФГВ.— 1991.— 27, № 5.
15. Анисичкин В. Ф. Разработка физических основ технологии компактирования ультрадисперсного алмаза. Отчет ИГиЛ СО РАН, 1991, Ден. в ВНИИЦ, инв. № 02.9.20.004495.

г. Новосибирск

Поступила в редакцию 4/II 1992

УДК 662.215.1

В. И. Нифадьев, Н. М. Калинина

К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ ДЕТОНАЦИИ ВЗРЫВЧАТЫХ СМЕСЕЙ, СОДЕРЖАЩИХ ВСПЕНЕННЫЙ ПОЛИСТИРОЛ

Рассматривается роль пенополистирола в возникновении и распространении процесса детонации в аммиачно-селитряных взрывчатых смесях пониженной плотности. Описан механизм детонации сверхнизкоплотных взрывчатых смесей (менее $0,2 \text{ г/см}^3$). На основании экспериментального материала показано наличие пульсирующей волны-предшественника, вызывающей газификацию пенополистирола во взрывчатой смеси перед фронтом детонационной волны. Собственно детонация происходит в газообразных продуктах термического разложения компонентов смеси при сжатии их продуктами детонации предшествующего слоя ВВ. Приведены значения мгновенных и фазовых скоростей волны газификации, а также частотные характеристики детонационной волны и волны газификации для взрывчатых смесей плотностью $0,06—0,5 \text{ г/см}^3$.

Представления о механизме возникновения и протекания детонационных процессов в низкоплотных взрывчатых смесях, содержащих вспененный полистирол, не могут быть достаточно полными без решения вопроса о роли в них пенополистирола (ППС). В настоящее время установлено [1, 2], что процесс сжатия ППС плотностью $\rho_* = 0,032 \div 1,04 \text{ г/см}^3$ сильными ударными волнами (УВ) сопровождается переходом его из твердого состояния в газообразное. При этом делается вывод, что (в от-

© В. И. Нифадьев, Н. М. Калинина, 1992.

личие от детонации) фазовое состояние ППС изменяется непосредственно во фронте волны и связано с кумулятивно-турбулентным механизмом диссипации энергии УВ, обусловленным струйчатым характером сжатия. Кумулятивные струи образуются при схлопывании пор, тормозятся на следующих слоях материала и влияют на появление новых струй вещества [2].

Изучение поведения сверхлегкого ППС ($\rho_* = 0,005 \div 0,025 \text{ г/см}^3$) при ударно-волновом воздействии различной интенсивности [3] позволило установить, что ППС переходит в газообразное состояние (газификация) не только при сжатии сильными ударными волнами, но и при воздействии на него сравнительно слабого ударно-волнового нагружения. Дальнейшие исследования показали, что процесс газификации в сверхлегком ППС ($\rho_* = 0,005 \div 0,007 \text{ г/см}^3$) при взрывании в стальных трубах диаметром 28—35 мм может распространяться на расстояние до $l = 2,5\text{—}3,0 \text{ м}$, причем на некотором удалении от боевика на участке $l \sim 1 \text{ м}$ процесс носит стационарный характер и распространяется со скоростью 700—1800 м/с [4]. Это позволило сделать вывод, что в определенных условиях газификация носит взрывчатый самоподдерживающийся характер и протекает с выделением тепла, т. е. в виде детонации.

На основании полученных результатов сделано предположение, что ППС может выполнять активную роль в процессе детонации низкоплотных ВВ, и особенно сильно эта роль должна проявиться при детонации сверхнизкоплотных взрывчатых смесей, имеющих насыпную плотность $\rho_{\text{см}} = 0,15 \div 0,02 \text{ г/см}^3$. В работе [5] к сверхнизкоплотным взрывчатым системам отнесены ВВ с $\rho_{\text{см}} \leq 0,25 \text{ г/см}^3$, однако применительно к смесям, содержащим вспененный полистирол, в данной работе верхняя граница плотности сдвинута до $0,15 \text{ г/см}^3$, так как именно с этой плотности начинается проявление специфических свойств, присущих рассматриваемым составам, приготовленным на основе ППС и аммиачной селитры (АС) (далее АС — ППС). Объемное содержание указанных компонентов в них выражается индексом в виде дроби, в числителе которой указывается объемное содержание в процентах АС, а в знаменателе — ППС. Детонация протекает в стальных трубах диаметром 28—70 мм со скоростью от 800 до 2500 м/с в зависимости от плотности и диаметра заряда.

Схематично процесс детонации сверхнизкоплотных взрывчатых смесей можно представить следующим образом [3]: сжатие, разогрев, газификация ППС; разогрев и разложение АС; взаимодействие продуктов разложения ППС и АС.

Экспериментальные исследования, проведенные в условиях взрывной камеры, показали, что в действительности детонация в указанных смесях носит более сложный характер, чем это следует из приведенной выше схемы. Так, при взрывании смесей плотностью $0,05\text{—}0,15 \text{ г/см}^3$ на стенках стальных труб обнаружены поперечные вздутия, по которым при достаточно высоком давлении они разрываются (рис. 1, а). Расстояние между такими вздутиями, постоянное по длине одной и той же трубы, изменялось в зависимости от плотности заряда от 6—7 до 17—18 см. В промежутках между вздутиями на внутренней и внешней сторонах труб обнаружены чередующиеся в определенной последовательности темные и светлые полосы, расположенные перпендикулярно направлению распространения детонации (рис. 1, б). Ширина темных полос в зависимости от состава смеси составляла $0,4 \div 0,5 \text{ см}$, светлых — $0,2 \div 2,5 \text{ см}$. Отмечены также сгущения этих полос, возникающие с той же закономерностью, что и вздутия по длине трубы.

Изучение характера следов и особенностей их чередования, а также регистрация процесса детонации с помощью скоростной фотосъемки позволили предположить, что поперечные полосы образуются в результате пульсирующего прохождения по трубе волны газификации ППС, а вздутия — в местах взрывчатого взаимодействия продуктов разложения ППС и АС. Расстояние между полосами соответствует длине колебания волны газификации ППС L_r , а между вздутиями — длине волны детонации смеси



Рис. 1. Следы на стенках стальных труб.

a — поперечные вздутия на трубе диаметром $d = 35$ мм, развернутой взрывом заряда из АС — ППС 5/95, $\rho_{см} = 0,07$ г/см³, расстояние между вздутиями 16 см, скорость детонации $D = 1100$ м/с; *b* — поперечные полосы, образовавшиеся на стенках трубы с $d = 35$ мм в результате высокоскоростной детонации смеси АС — ППС 8/92, $\rho_{см} = 0,09$ г/см³, $D = 1600$ м/с; *в* — эллипсоидные отпечатки струй продуктов газификации на внутренней стороне стенки трубы с $d = 55$ мм, образовавшиеся при взрывании смеси АС — ППС 3/97, $\rho_{см} = 0,05$ г/см³, $D = 950$ м/с.

L_d . Для смесей с $\rho_{см} = 0,5; 0,2; 0,13$ и $0,06$ г/см³ $L_d = 4-5, 6-7, 8-9$ и $16-18$ см соответственно.

Наличие чередующихся полос, а также периодическое их сгущение свидетельствуют о пульсирующем характере процесса газификации ППС, протекающего перед фронтом детонационной волны. Сама детонационная волна, судя по характеру вздутий труб и чередования их с поперечными полосами, представляет собой скачкообразное перемещение зоны максимального тепловыделения вслед за пульсирующей волной газификации.

Установлено, что среднее значение периода волны газификации $T_r \sim 4 \div 8$ мкс, а время между скачками детонации $T_d = 50 \div 150$ мкс в зависимости от плотности смеси, соотношения и плотности входящих в нее компонентов, а также от диаметра заряда и прочности оболочек.

На стенках труб обнаружены также различающиеся по размеру, по геометрически подобные следы ожогов металла эллипсоидной формы (рис. 1, *в*). Соотношение малого и большого диаметров у таких эллипсов по всей длине труб практически постоянно и равно $1,0 : 1,3$, толщина контура эллипсов $0,2 \div 0,5$ мм, внешний размер малых диаметров $0,5 \div 0,9$, а больших $0,6 \div 1,2$ см. Все отпечатки указанных размеров большей осью сориентированы перпендикулярно продольной оси трубы. Характерно, что эрозия металла, наблюдаемая в виде ожога, отмечается только по контуру эллипсов, а внутри контура и за его пределами видимого различия нет.

При более тщательном рассмотрении по всей площади внутренних и внешних стенок труб различаются отпечатки значительно меньших размеров и с меньшей интенсивностью их проявления. Ориентация осей этих отпечатков произвольная, что, очевидно, связано с переменным давлением в зоне газификации, обусловленным разновременностью разложения гранул ППС различного размера и плотности.

На стенках труб обнаружены также узкие бороздки шириной $0,2-0,5$ мм, расположенные под углом $40-45^\circ$ к оси заряда на расстоянии от $1-2$ до $20-30$ мм друг от друга и образующие систему параллельных и перекрещивающихся полос. Наличие эллипсоидных и бороздчатых отпечатков свидетельствует не только о наличии струй и завихрений в зоне газификации ППС, но также о довольно высокой температуре в этих струях.

Кроме отпечатков, оставленных струями сравнительно небольшой мощности, обнаружены продольные полосы на стенках труб, которые соответствуют прохождению наиболее мощных струй, получающих ускорение при воздействии на них расширяющихся продуктов детонации (ПД).

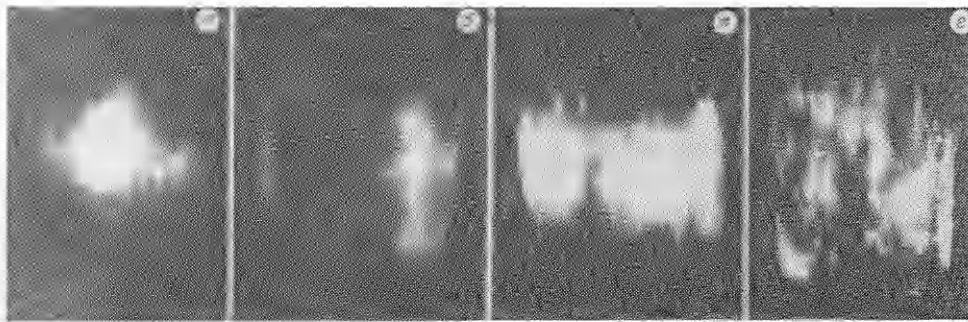


Рис. 2. Продольные струи в зоне газификации ППС при детонации.
 а — АС — ППС 50/50, $\rho_{\text{см}} = 0,5 \text{ г/см}^3$; $\rho_* = 0,006 \text{ г/см}^3$; б — АС — ППС 20/80, $\rho_{\text{см}} = 0,24 \text{ г/см}^3$; $\rho_* = 0,006 \text{ г/см}^3$; в — АС — ППС 20/80 с невспенным полистиролом, $\rho_{\text{см}} = 0,74 \text{ г/см}^3$; г — АС — ППС 5/95, $\rho_* = 0,006 \text{ г/см}^3$, $\rho_{\text{см}} = 0,06 \text{ г/см}^3$.

При достаточно большой плотности заряда наиболее мощные высокотемпературные струи ослабляют прочность металла в местах их прохождения, что создает впечатление, будто струи разрезают трубы на продольные полосы различной ширины. Поперечный разрыв труб происходит в местах, соответствующих взрывчатому взаимодействию компонентов смеси, в которых давление и концентрация ПД максимальны.

Наличие продольных струй в зоне газификации ППС при детонации смесей различной плотности и изменение их интенсивности с уменьшением плотности хорошо видны на кадрах, полученных при регистрации процесса детонации с помощью скоростного фоторегистратора в режиме луны времени (рис. 2).

Исходя из полученных результатов, можно прийти к заключению, что детонация в низкоплотных взрывчатых смесях распространяется по следующей схеме. В результате воздействия инициирующего импульса в прилегающем к боевику слое взрывчатой смеси происходит химическая реакция взрывчатого превращения с задержкой на время, соответствующее времени развития процессов на гранулах смеси. Впереди нее по заряду распространяется волна сжатия (тепловая волна-предшественник), интенсивности которой достаточно, чтобы вызвать разогрев гранул ППС и их термическое разложение на расстоянии $\sim 5-10$ см от боевика. Наличие такой зоны разогрева ППС наблюдалось при скоростной фотосъемке развития процесса детонации в смесях с $\rho_{\text{см}} = 0,05 \div 0,2 \text{ г/см}^3$. ППС разлагается взрывчато с образованием газообразных ионизированных продуктов, которые в зоне газификации существуют в плазменном состоянии в виде высокотемпературных струй, движение которых носит турбулентный характер. По-видимому, в зоне сжатия газообразных компонентов взрывчатое превращение может протекать в форме теплового взрыва во всем объеме одновременно.

При рассмотрении характера разрушения некоторых труб создается впечатление, что струя раскаленных продуктов газификации, двигаясь по ходу детонации и прожигая стенку насквозь, меняет направление движения на противоположное, поворачиваясь при этом в поперечном сечении трубы примерно на 180° (рис. 3).

Одновременно с описанными процессами волна-предшественник продолжает распространяться, вызывая газификацию компонентов следующего слоя взрывчатой смеси. Продукты взрыва расширяются и подпитывают эту волну, о чем свидетельствует периодическое сгущение поперечных полос на стенках труб.

Для изучения характера пульсаций волны газификации в низко- и сверхнизкоплотных взрывчатых смесях проведена серия взрывов зарядов различной плотности в стеклянных трубах с $d = 55$ мм и с регистрацией в режиме луны времени. Интервал между кадрами составлял 2, 4 и

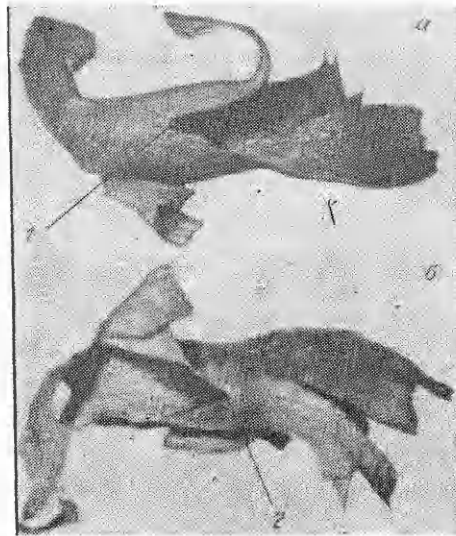


Рис. 3. Отверстия, образовавшиеся в стенке трубы с $d = 55$ мм в результате движения струи раскаленных продуктов газификации по ходу детонации (а) и в противоположном направлении (б).

1, 2 — выходы струй на противоположных стенках трубы, расстояние между выходами 4 см.

8 мкс. Взрыв инициировали боевиком из аммонита 6ЖВ массой 70 г. Для сравнения измерены пульсации при газификации ППС без добавок каких-либо других активных компонентов. Для каждого отрезка времени измерено расстояние, на которое перемещался передний фронт волны газификации, а также определена скорость его перемещения v_f .

На основании полученных результатов построены графики, отражающие характер движения волны газификации в ППС и во взрывчатых смесях с $\rho_{см} = 0,02 \div 0,5$ г/см³. На рис. 4 приведены наиболее характерные графики пульсаций на участке длиной 20—40 см, непосредственно примыкающем к боевику. Фазовые перемещения зоны свечения, измеренные по фотографиям, происходят со скоростью от 0 до $(25-30) \cdot 10^3$ м/с.

Частота пульсаций волны газификации в зависимости от плотности взрывчатой смеси и удаленности от боевика изменяется от 25 до 120 кГц, частота крупномасштабных пульсаций волны детонации — от 10 до 20 кГц. Сопоставление с результатами, приведенными в [6] для смеси селитры с дизельным топливом и тротила и его смесей, показывает, что частота детонационной волны в низкоплотных взрывчатых смесях ниже в сравнении с ВВ типа АС—ДТ в 15—30 раз, а в сравнении с тротилсодержащими ВВ — в 100—250 раз. Низкочастотное пульсирующее распространение детонации может быть одной из причин высокой работоспособности рассматриваемых смесей.

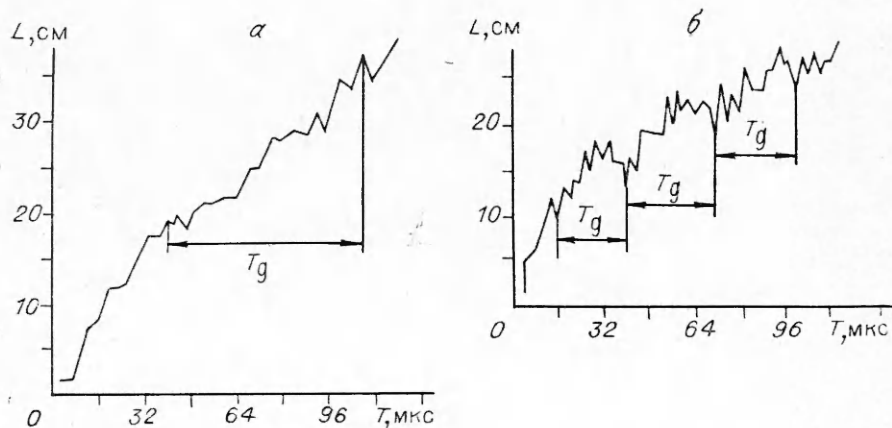


Рис. 4. Перемещение переднего фронта волны газификации в смесях типа АС — ППС по длине заряда диаметром 55 мм в различные промежутки времени.
а — АС — ППС 5/95; б — АС — ППС 20/80.

Неоднородность структуры фронта волны газификации, а также характер пульсаций этой волны в сверхсверхплотных взрывчатых смесях тесно связаны с критическими размерами зарядов, условиями их инициирования и устойчивого распространения детонации. Экспериментально установлено, что критический диаметр при помещении заряда в достаточно прочную оболочку может быть доведен практически до размеров гранулы пенополистирола. Надежное инициирование достигается в шнурах от 15—20 г аммонита 6ЖВ, в скважинах диаметром 110—150 мм — от 200—500 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bolhovitinov L. G., Khvostov Ju. B. // Natur.— 1976.— 274, N 5674.— P. 882—883.
2. Хвостов Ю. В., Болховитинов Л. Г. // Взрывное дело, № 90/47.— М.: Недра, 1991.— С. 196—207.
3. Нифадьев В. П., Калинина П. М. Проблемы открытой разработки глубоких карьеров // Тр. Междунар. симп. «Мирный-91», 25—27 июля 1991 г., Удачный, НИИ Мастер, 1991.— С. 257—263.
4. Нифадьев В. П., Калинина П. М. О результатах исследования газификации пенополистирола при ударно-волновом нагружении // ФГВ.— 1992.— 28, № 6.
5. Austing J. L., Tulis A. J., Johnson C. D. Fifth symp. on Detonation, Aug. 18—21, 1970, Pasadena.— P. 47—57.
6. Даниленко В. А., Афанасенков А. П. // Докл. АН СССР.— 1981.— 256, № 6.— С. 1409—1411.

г. Бишкек

Поступила в редакцию 13/III 1991,
после доработки — 17/II 1992

УДК 534.222.2 + 532.529 + 536.468

В. Ш. Шагапов, Д. В. Абдрашитов

СТРУКТУРА ВОЛН ДЕТОНАЦИИ В ПУЗЫРЬКОВОЙ ЖИДКОСТИ

Рассматриваются уединенные детонационные волны в системах жидкость — пузырьки газа при наличии энергосыделения в газовой фазе. Исследование проведено в рамках двухскоростной модели динамики пузырьковых сред. Учет относительного движения фаз связан с существенным влиянием его на процесс межфазного теплообмена. Установлено, что условие Чепмена — Жуке, по-видимому, в общем случае не может быть автоматически перенесено на случай пузырьковой детонации. Немонотонная зависимость скорости волны детонации от объемного содержания пузырьков связана с проявлением сжимаемости несущей фазы и относительным движением фаз.

Результаты экспериментальных исследований волн детонации в пузырьковых средах описаны в работах [1—5], а теоретических — в [6—13]. Качественное исследование ударных волн (УВ) в пузырьковой жидкости при наличии химических реакций в газовой фазе проведено в [10, 13]. На основе модели динамики пузырьковых систем, учитывающей радиальную инерцию пузырьков, теплообмен и тепловыделение, показано расщепление УВ на уединенную детонационную волну (УДВ) и УВ, характерную для пузырьковых систем при отсутствии энергосыделения. Однако теплообмен, задаваемый в предположении, что он лимитируется тепловым сопротивлением газовой фазы (без учета относительного движения фаз), не может компенсировать тепловыделение в УДВ.

В связи с этим в настоящей работе проводится изучение УДВ в рамках модели динамики пузырьковых сред с учетом относительного движения фаз, приводящего к существенной интенсификации теплообмена.

© В. Ш. Шагапов, Д. В. Абдрашитов, 1992.