

проведенных экспериментов маховского взаимодействия не отмечено. В случае СНВ₃ взаимодействие носит более сложный характер и требует дополнительного изучения.

В экспериментах с пористыми образцами получено увеличение давления в преграде на торце заряда с уменьшением плотности образца.

Поступила в редакцию 24/1 1984

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. А. Ададулов, А. И. Дремин и др. ФГВ, 1967, 3, 2.
2. А. И. Дремин, Г. И. Канель, В. Д. Глузман. ФГВ, 1972, 8, 1.
3. А. А. Дерибас, А. М. Ставер. ФГВ, 1974, 10, 4.
4. Ф. А. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станюкович и др. Физика взрыва. М.: Наука, 1975.
5. Л. В. Альтшулер, А. А. Баканова, П. П. Дудолодов. ЖЭТФ, 1967, 53.
6. R. D. Dick. J. Chem. Phys., 1970, 52, 12.
7. Compendium of Shock Wave Data. University of California, Livermore, 1966.
8. J. Thouvenin. 4-th Symp. (Intern.) on Detonation. Washington, 1965.
9. М. Ф. Гоголя, И. М. Воскобойников, Н. Г. Демченко. ФГВ, 1980, 16, 1.

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ СИСТЕМ ЖИДКОСТЬ — ПУЗЫРЬКИ ГАЗА УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

А. И. Сычев

(Новосибирск)

Ударные волны в системах жидкость — пузырьки газа отличаются рядом характерных особенностей. Процессы распространения и структура падающих и отраженных ударных волн в жидкости с пузырьками газа при пара экспериментально и теоретически исследовались в [1—4] и приведенных в них соответствующих ссылках. Изучение разрушения одиночных пузырьков проведено в [5—7]. Исследования [1—7] выполнены на примере химически реагирующих систем.

Одним из наиболее существенных свойств рассматриваемых систем является сжимаемость пузырьков в ударной волне. Вследствие сжатия температура газа в пузырьке повышается и может оказаться достаточной для воспламенения системы, содержащей химически реагирующие вещества.

Можно выделить следующие типы химически активных систем:

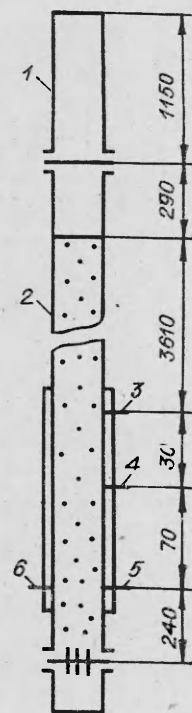
- I — реагирующая жидкость — пузырьки активного газа;
- II — жидкость — горючее (или окислитель) — пузырьки газа — окислитель (или горючее);
- III — активная жидкость — пузырьки не реагирующего газа;
- IV — активная жидкость — пузырьки активного газа.

Процессы, протекающие в химически активных системах при распространении в них ударных волн, изучены недостаточно. Парогазовые пузырьки в жидких ВВ (системы III и IV) исследованы в [8]. Воспламенение одиночных пузырьков, заполненных водородо- или ацетилено-кислородной смесью в воде и цепочки пузырьков со смесью 70% Ag + 30% (2H₂ + O₂) в глицерине (системы I) ударной волной изучались в [9, 10] и [11] соответственно. Процессы, сопутствующие распространению ударных волн в системах I, содержащих значительное число равномерно распределенных в жидкости пузырьков, и в системах II не исследованы. Задача настоящей работы — выяснить условия воспламенения систем I и II ударной волной.

Экспериментальные исследования выполнены на вертикально расположенной гидродинамической ударной трубе из нержавеющей стали с внутренним диаметром 35 мм (рис. 1), состоящей из секций высокого (1) и низкого (2) давления с разрывной диафрагмой между ними. Пу-

Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки.

зырьки в жидкости, заполняющей секцию 2, генерировались при прохождении газа через систему из 12 капиллярных отверстий. Вблизи торца ударной трубы располагалась оптическая секция из нержавеющей стали с окнами из оргстекла (размеры прозрачной щели 8×240 мм). Заподлицо с внутренней поверхностью окон устанавливались пьезоэлектрические датчики давления: датчик 3, запускающий осциллограф ОК-33, и 4, 5 — регистраторы параметров ударных волн, сигнал с которых подавался на осциллограф через истоковый повторитель с входным сопротивлением $\sim 10^9$ Ом. Постоянная времени каждого датчика с параллельной емкостью ~ 1 с. Характеристики пьезодатчиков и способ их крепления описаны в [12]. Для регистрации свечения, сопровождающего процесс воспламенения газожидкостных систем, использовался фотоэлектронный умножитель ФЭУ-31, оптический ввод которого 6 располагался диаметрально противоположно датчику давления 5. Оптическая съемка процесса велась барабанным фоторегистратором. Объемная концентрация газовой фазы $\beta_0 = \Delta h(h + \Delta h)^{-1}$ определялась по подъему столба жидкости высотой h на величину Δh при прохождении через жидкость пузырьков газа. Давление на поверхности жидкости с пузырьками газа поддерживалось равным 1 атм. Ударная волна в газожидкостной системе генерировалась посредством сжигания смеси ($C_2H_2 + 2,5O_2$) в секции 1 (см. рис. 1). Интенсивность ударных волн варьировалась изменением начального давления $p_{0в}$ смеси.



В работе исследовались следующие системы:

1. $H_2O - (C_2H_2 + 2,5O_2)$;
2. $(50\% H_2O + 50\% (CH_2OH)_2CHON) - (C_2H_2 + 2,5O_2)$;
3. $C_7H_{16} - O_2$;
4. $C_9H_{20} - O_2$;
5. $C_{13}H_{28} - O_2$;
6. $C_{16}H_{34} - O_2$.

Смеси 1, 2 относятся к системам I, 3—6 — к системам II. Для сравнения исследованы химически не реагирующие системы $H_2O - N_2$ (7) и $C_7H_{16} - N_2$ (8).

Установлено: распространение ударной волны в системах 1—6 сопровождается воспламенением, фиксируемым с помощью ФЭУ-31 и наблюдаемым визуально. При этом воспламеняется в системах I — горючий газ, в системах II — химически взаимодействующие вещества. В последних воспламенению предшествует ряд физических процессов, ответственных за подготовку системы к горению: перенос жидкости в объем пузырька, ее испарение, перемешивание горючего и окислителя и т. п. В наличии процессов смесеобразования, задерживающих воспламенение, заключается качественное различие систем II и I.

Более подробно исследованы системы 1, 3, 7 и 8 (скорость звука в H_2O и C_7H_{16} равна 1497 (при $25^\circ C$) и 1162 м/с (при $20^\circ C$) соответственно). Опыты проведены при $\beta_0 = 6-8\%$. Диаметр пузырьков в системах 1, 7 и 3, 8 равен 3,5—4,0 и 3,0—3,5 мм соответственно. Осциллограммы, иллюстрирующие распространение падающей ударной волны в газожидкостных системах, приведены на рис. 2. Свечение наблюдается в системах, содержащих химически реагирующие вещества, при распространении в них ударных волн с интенсивностью p_1 выше критической p_1^* (рис. 2, а). Ударные волны меньшей интенсивности не вызывают свечения среды (рис. 2, б). Величина p_1^* зависит от свойств компонентов системы: давле-

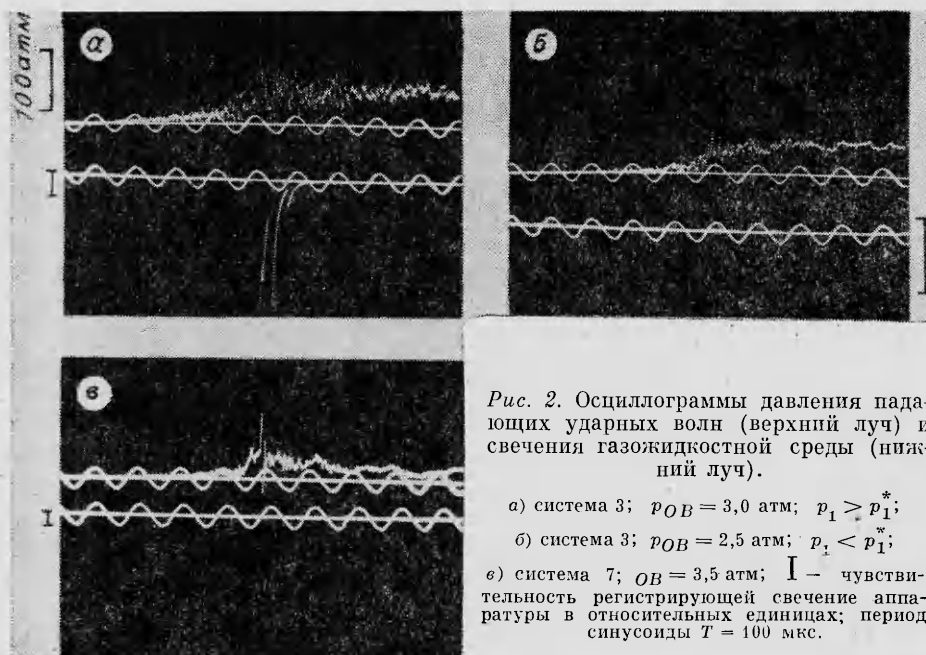


Рис. 2. Осциллограммы давления падающих ударных волн (верхний луч) и свечения газожидкостной среды (нижний луч).

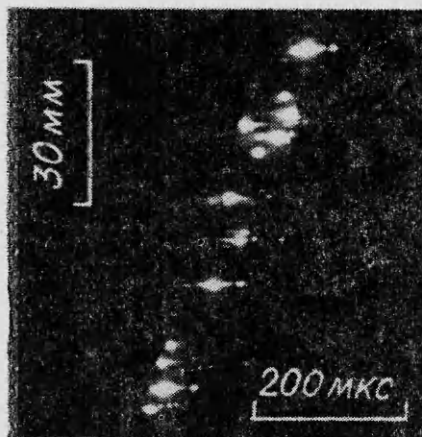
а) система 3; $p_{OB} = 3,0$ атм; $p_1 > p_1^*$;

б) система 3; $p_{OB} = 2,5$ атм; $p_1 < p_1^*$;

в) система 7; $p_{OB} = 3,5$ атм; I — чувствительность регистрирующей аппаратуры в относительных единицах; период синусоиды $T = 100$ мкс.

ние в ударной волне вдали от фронта в системе 3 $\sim 60-70$ и $\sim 40-50$ атм в системе 1 ($p_{OB} = 3,0$ и $3,5$ атм соответственно). Вблизи фронта регистрируемые давления в 2—3 раза выше. При распространении ударных волн в химически не реагирующих системах свечение также отсутствует (рис. 2, в). Эти факты свидетельствуют о том, что свечение не может быть результатом только нагрева газа при сжатии пузырька в ударной волне и, кроме того, исключают возможность присутствия во время опыта «паразитной» световой наводки на вводе ФЭУ-31. Таким образом, причина наблюдаемого свечения — воспламенение газожидкостных систем: распространение в химически активной смеси жидкости с пузырьками газа ударной волны с интенсивностью выше критической сопровождается химическими реакциями, т. е. сопровождается энергосвободением за фронтом.

На рис. 3 видны характерные особенности воспламенения газожидкостной системы ударной волной: за воспламенением горючей смеси следует разрушение пузырьков; после их разрушения происходит образование более мелких вторичных пузырьков, которые также воспламеняются. При этом пузырьки ускоряются потоком жидкости за фронтом волны. Длина зоны, в которой регистрируется воспламенение пузырьков, ~ 6 см.



Скорость ударных волн определялась по фоторазверткам самосвечения и по показаниям двух датчиков давления (рис. 4, а). Скорость волны с интенсивностью p_1^* в системах 1 и 3 равна 400 и 250 м/с соответственно.

Профили давления падающих ударных волн в системах 1 и 3 (см. рис. 4, а и 2, а соответственно) имеют сходную структуру: вслед за небольшим плав-

Рис. 3. Фоторегистрограмма развертки самосвечения волны в системе 1.

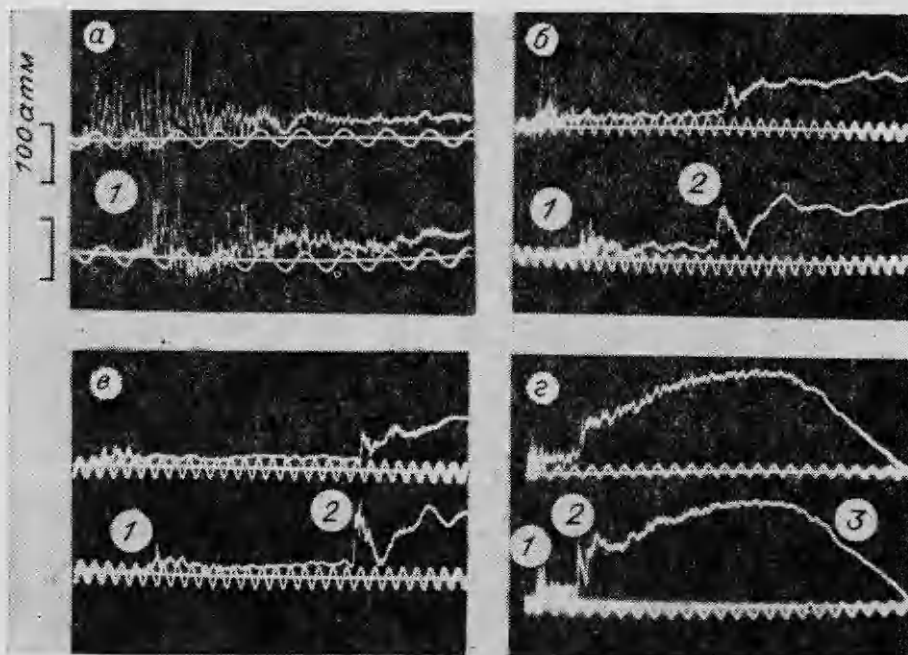


Рис. 4. Осциллограммы давления падающих и отраженных волн.

а) система 1; $p_{OB}=3,5$ атм; $p_1 > p_1^*$; б) система 3; $p_{OB}=3,0$ атм; $p_1 > p_1^*$; в) система 7; $p_{OB}=3,5$ атм; г) система 3; $p_{OB}=3,0$ атм; $p_1 > p_1^*$; 1 — падающая ударная волна; 2 — отраженная ударная волна; 3 — волна разрежения; период синусоиды: а—в — $T=100$ мкс, г — $T=500$ мкс.

ным ростом давления (предвестником) появляются пульсации давления, которые заканчиваются через 150—250 мкс, затем давление выходит на почти постоянный уровень. Пульсации давления являются следствием осцилляций пузырьков газа: после сжатия в ударной волне пузырек начинает расширяться, излучая в окружающую среду волну давления. Если в процессе сжатия происходит воспламенение пузырька, то давление газа в нем возрастает, что может привести к усилению излучаемой волны давления. В жидкости без пузырьков пульсации давления отсутствуют. Расстояние, на котором существуют интенсивные пульсации давления за фронтом ударной волны, коррелирует с длиной зоны горения, определяемой по фоторазверткам самосвечения.

На осциллограммах рис. 4, б, в можно наблюдать процесс отражения ударных волн от торца трубы. Отношение давлений в отраженной и падающей волнах $p_2/p_1 = 3,0 \div 4,0$ и $4,0 \div 4,5$ соответственно. (В системе 1 при $p_{OB} = 3,5$ атм $p_2/p_1 = 3,0 \div 3,5$.) Скорость отраженных волн близка к скорости звука в жидкостях.

Более полно процесс отражения ударных волн в газожидкостных системах проиллюстрирован на рис. 4, г. Обращает на себя внимание рост давления за фронтом отраженной волны, связанный с процессами сжатия газожидкостной среды. Давление в отраженной волне выходит на максимум, затем следует плавная волна разрежения. В системе 1 профиль давления имеет аналогичный вид.

Автор признателен А. В. Пинаеву и В. В. Митрофанову за полезные обсуждения и критические замечания.

Поступила в редакцию 30/XI 1983,
после доработки — 6/III 1984

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. К. Бетчелор. Механика. Сб. переводов, 1963, 3, 109, 65.
2. Б. Р. Паркин, Ф. Р. Гилмор, Г. Л. Бруд.— В кн.: Подводные и подземные взрывы. М.: Мир, 1974.

3. А. А. Борисов, Б. Е. Гельфанд, Р. И. Нигматулин и др. Докл. АН СССР, 1982, 263, 3, 594.
4. Б. Е. Гельфанд, А. В. Губанов, Е. И. Тимофеев. Изв. АН СССР, МЖТ, 1982, 2, 159.
5. В. К. Кедринский, Р. И. Солоухин. ПМТФ, 1961, 1, 27.
6. Б. Е. Гельфанд, С. А. Губин, Р. И. Нигматулин и др. Докл. АН СССР, 1977, 235, 2, 292.
7. Ю. П. Гребенкин, В. М. Крячко. Вестн. ЛГУ. Сер. физика, химия, 1978, 22, 4, 79.
8. А. В. Дубовик, В. К. Боболев. Чувствительность жидких взрывчатых систем к удару. М.: Наука, 1978.
9. В. К. Кедринский. ФГВ, 1980, 16, 5, 14.
10. Р. И. Солоухин. Докл. АН СССР, 1961, 136, 2, 311.
11. T. Hasegawa, T. Fujiwara, M. Yasuhara. 9-th Intern. Coll. on Dynamics of Explosions and Reactive Systems. Book of Abstracts. Poitiers, 1983.
12. А. В. Пинаев. ФГВ, 1983, 19, 1, 105.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПОДОБИЯ ТЕЧЕНИЯ ПРИ ДЕТОНАЦИИ ЛИНЕЙНОГО ЗАРЯДА ВВ В АТМОСФЕРЕ

В. И. Мали, С. А. Новопашин, С. Ф. Чекмарев
(Новосибирск)

Исследуется движение продуктов детонации и окружающего газа при детонации линейного заряда ВВ в атмосфере. Основное внимание уделяется течению на больших расстояниях от детонационной волны (много больших радиуса заряда). Ранее течение исследовалось в [1—3] применительно к распространению ударных волн в атмосфере при движении метеоритов, инициированию детонации в других средах, определению воздействия на стенки взрывных камер. В этих работах в основном изучалось движение ударной волны в атмосфере (в воздухе), движение самих продуктов детонации практически не рассматривалось. Для описания зависимости характеристик ударной волны от свойств ВВ использовался принцип энергетического подобия [4]. В данной работе, являющейся продолжением [4], получены экспериментальные данные по движению ударных волн в атмосфере различных газов (воздух, гелий, аргон) и при различных давлениях, а также по движению самих продуктов детонации, в частности границы продуктов детонации. Для анализа подобия течения используется струйная аналогия [4], которая дает возможность установить свойства подобия течения в целом. Выводы о подобии течения иллюстрируются экспериментальными данными. Обсуждается связь подобия течения на основе энергетического принципа и струйной аналогии.

Методика и условия проведения экспериментов. Методика проведения экспериментов и оборудование описаны в [4]. Дополнительно для визуализации ударных волн в атмосфере применялся один из вариантов метода расфокусированных диафрагм [5]: между задним окном взрывной камеры и лампой для подсветки устанавливали целевую решетку (ширина щелей 1 мм, расстояния между краями щелей 1 мм, сами щели расположены параллельно заряду ВВ).

В качестве заряда ВВ использовали цилиндрический заряд радиусом $r_z = 0,65$ мм и длиной около 400 мм, плотность заряда $\rho_z = 1,5 \cdot 10^3$ кг/м³, скорость детонации $D \approx 7,1$ км/с. В качестве окружающего газа применяли воздух ($p_\infty = 1,96 \cdot 10^3 \div 9,8 \cdot 10^4$ Н/м²), аргон ($p_\infty = 4,8 \cdot 10^4 \div 9,8 \cdot 10^4$ Н/м²) и гелий ($p_\infty = 2,88 \cdot 10^5$ Н/м²). Во всех случаях $T_\infty \approx 290$ К.

На рис. 1 показан характерный пример теневой фотографии (фото-развертки) картины течения, окружающий газ — аргон при $p_\infty = 9,8 \times 10^4$ Н/м². Скорость фоторазвертки на СФР $3,75 \cdot 10^3$ об./мин. Если с учетом скорости детонации пересчитать временной масштаб на простран-