

УДК 534.222.2+532.529

УДАРНЫЕ И ДЕТОНАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ В ЖИДКОСТИ И ПУЗЫРЬКОВЫХ СРЕДАХ ПРИ ВЗРЫВЕ ПРОВОЛОЧКИ

И. И. Кочетков, А. В. Пинаев

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск
kii@hydro.nsc.ru, avpin@ngs.ru

Проведены измерения параметров ударных волн при взрыве проволочек в газе, жидкости, пузырьковых инертных и реагирующих средах в вертикальной ударной трубе. Обсуждаются проблемы измерения скорости ударных волн в жидкости и пузырьковой инертной среде, проведено сравнение экспериментальных данных с теоретическими расчетами. В пузырьковой химически активной среде исследовано возбуждение самоподдерживающейся детонации короткой ударной волной от взрыва проволочки.

Ключевые слова: взрыв проволочки, ударная волна, скорость звука, жидкость, пузырьковая среда, пузырьковая детонация.

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1–5] обнаружена и подробно исследована самоподдерживающаяся пузырьковая детонация (ПД) в химически активной пузырьковой среде — волна солитонного типа с выделением энергии в пузырьках, распространяющаяся со скоростью, превышающей равновесную скорость звука c_0 в пузырьковой среде, но меньшей скорости звука в жидкости c_l . Пузырьковую детонацию инициировали волной газовой детонации, падающей сверху на поверхность пузырьковой среды. При таком способе инициирования от протяженной волны сжатия в газожидкостной среде через некоторое время отделялась короткая ($3 \div 5$ см) волна ПД коноидальной формы с пульсациями давления, обусловленными осцилляциями сгоревших пузырьков. С уменьшением вязкости жидкости расстояние, на котором происходило отделение волны пузырьковой детонации, возрастало до нескольких метров, что создавало трудности в изучении ПД.

Для сокращения времени формирования волны ПД в настоящей работе предложено инициировать процесс короткими ударными волнами (УВ) от взрыва проволочек в пузырьковой среде. Необходимо выяснить, можно ли возбудить таким способом пузырьковую детонацию и насколько быстро волна ПД выйдет на стационарный режим. С целью проведения

сравнительного анализа в работе исследованы УВ, образованные от взрыва проволочек в газе, жидкости, пузырьковых инертных и реагирующих средах при одинаковых параметрах разрядной электрической цепи.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА, МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Эксперименты проводили в вертикальной ударной трубе длиной 4.5 м с внутренним диаметром 35 мм. Параметры волн измеряли в верхней и нижней секциях 6, 7, секция 5 предназначена для определения положения границы пузырьковой среды и начальной объемной концентрации пузырьков β_0 (рис. 1). На верхнем фланце 4 трубы крепили подвижные медные электроды 2 диаметром 3 мм. Схемы размещения электродов в верхней секции 6 приведены на рис. 2. Между электродами снизу припаивали проволочку из манганина длиной $9 \div 12$ мм, сопротивлением $0.26 \div 0.35$ Ом. Источник высокого напряжения 1 заряжал конденсатор емкостью $C_1 = 50$ мкФ до начального напряжения $U_{10} = 4 \div 8$ кВ (запасенная энергия $W_0 = 0.44 \div 1.60$ кДж), максимальная амплитуда разрядного тока в цепи составляла $I_0 = 9 \div 18$ кА, выделившаяся энергия в проволочке $W_1 = 0.286 \div 1.040$ кДж (коэффициент передачи энергии в проволочку $W_1/W_0 = 67.5$ %). Ток измеряли в разрядной цепи на шунте с сопротивлением 8.5 мОм. В качестве жидкости в трубе использовали смесь

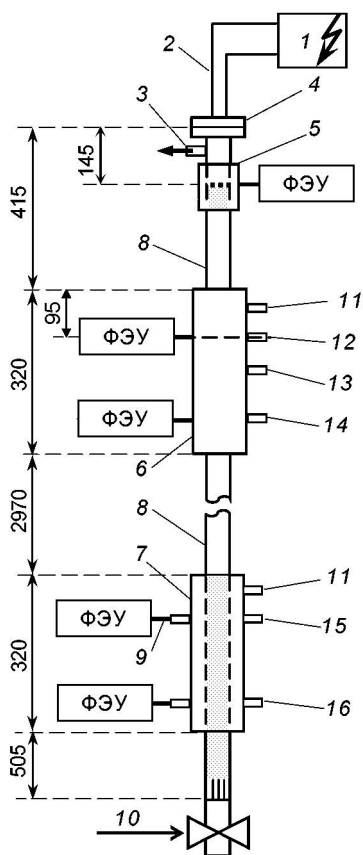


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки:

1 — источник высокого напряжения, 2 — электроды, 3 — трубка выхода газа, 4 — фланец, 5 — секция измерения уровня пузырьковой среды, 6, 7 — верхняя и нижняя измерительные секции, 8 — секция трубы, 9 — световод, 10 — вентиль подачи газа, 11 — датчики запуска осциллографов, 12–16 — пьезодатчики измерительные, ФЭУ — фотоэлектронный умножитель

$0.75\text{H}_2\text{O} + 0.25$ глицерина ($c_l = 1600$ м/с), в качестве газов в пузырьках — воздух либо смесь $\text{C}_2\text{H}_2 + 2.5\text{O}_2$. Снизу трубы располагался генератор пузырьков из тонких трубочек, создающих пузырьки диаметром $3 \div 4$ мм.

Давление измеряли турмалиновыми либо пьезокерамическими (ЦТС-19) датчиками с собственной частотой 300 кГц. Для регулирования напряжения и увеличения постоянной времени датчиков использовали источник повторитель с входным сопротивлением 10^9 Ом. Скорость волн сжатия определяли по осциллограммам давления. Свечение в пузырьковых средах регистрировали фотоэлектронными умножителями, световые вводы которых были установлены напротив пьезодат-

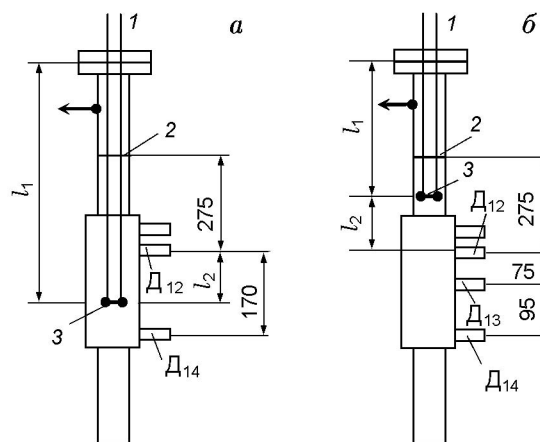


Рис. 2. Принципиальная схема размещения электродовверху трубы:

1 — электроды, 2 — уровень жидкости, 3 — проволочка, D_{12} – D_{14} — пьезодатчики; а — $l_1 = 525$ мм, $l_2 = 110$ мм; б — $l_1 = 320$ мм, $l_2 = 168$ мм

чиков (см. рис. 1). Для записи электрических сигналов использовали два 4-лучевых осциллографа Tektronix.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Взрыв проволочки в воздухе

Для изучения взрыва проволочек в воздухе (начальное давление $p_0 = 0.1$ МПа) опыты проводили в постановке, показанной на рис. 2, а, без жидкости. Характерные осциллограммы напряжения на конденсаторе U_1 , разрядного тока I и давления от взрыва проволочки представлены на рис. 3. Начальные участки профилей U_1 , I приведены на рис. 3, б, где времени разрушения проволочки 3.3 мкс соответствует резкий спад тока. Здесь и на следующих осциллограммах стрелкой в левом верхнем углу показан момент запуска осциллографа.

На участке трубы от места взрыва проволочки до датчика D_{12} ($l_2 = 110$ мм) средняя скорость ударной волны составляла $\bar{v} = 670 \div 700$ м/с, длительность первой основной области сжатия за фронтом УВ 50 мкс, что представляет интерес для инициирования детонации в химически активной газожидкостной среде. Здесь и в дальнейшем под средней скоростью УВ подразумевается значение скорости ее фронта $\bar{v} = L/\Delta t$, где Δt — интервал времени на базе измерения ($L = l_2$). Измеренный датчиком D_{12} перепад давления на фронте

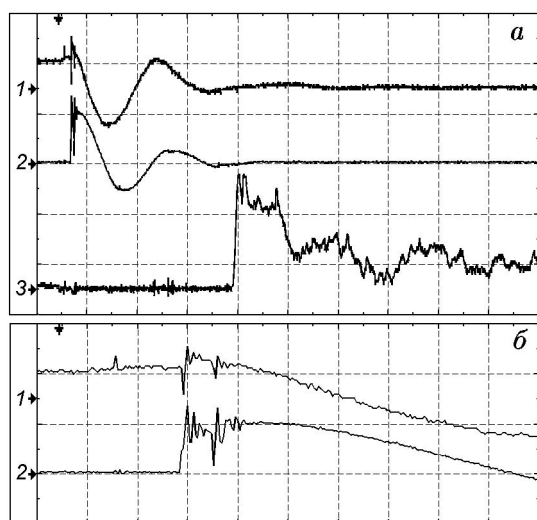


Рис. 3. Осциллограммы напряжения (луч 1), разрядного тока (луч 2) и давления УВ (луч 3) в воздухе, $W_0 = 0.625$ кДж:

по горизонтали: a — 50 мкс/дел., b — 5 мкс/дел.; по вертикали: 1 — 10 кВ/дел., 2 — 11.7 кА/дел., 3 — 0.07 МПа/дел. ($v = 530$ м/с); b — начальные участки профилей 1, 2

УВ составил $\Delta p = p - p_0 = 0.16$ МПа, расчетная (по скачку давления) мгновенная скорость волны в окрестности датчика — $v = 530$ м/с.

Взрыв проволоочки в воздухе характеризуется быстрым затуханием УВ до звуковой — в нижней секции трубы волна уже не регистрируется пьезодатчиками.

Ударная волна в жидкости

Для выяснения характера распространения УВ в сторону свободной границы жидкости (вверх) и вниз проведены эксперименты в постановке, соответствующей рис. 2, a . Время от начала разряда до момента разрыва проволоочки (когда ток резко падает) составляло $3.3 \div 4.1$ мкс, после чего происходило расширение плазменного пузыря. Характерные осциллограммы напряжения, разрядного тока и давления в ударной волне приведены на рис. 4 (здесь расстояние от проволоочки до поверхности жидкости 385 мм). Амплитуды давления на датчиках D_{12} и D_{14} равны соответственно 26 и 56 МПа.

Максимальное давление волны, регистрируемое нижним датчиком, находится в пределах $30 \div 55$ МПа, верхним датчиком — в интервале $17 \div 34$ МПа. В связи с затуханием волны и большей удаленностью верхнего датчика амплитуда давления на нем примерно в два раза ниже, чем на нижнем датчике. На датчик D_{14} фронт волны приходит всего на 20 мкс быстрее, чем на датчик D_{12} , хотя расстояние до датчика D_{12} примерно в два раза больше, чем до датчика D_{14} . Вверх волна движется со скоростью, близкой к скорости c_l или даже превышающей ее на $100 \div 200$ м/с, что, вероятно, объясняется разгоном границы расширяющейся полости до сверхзвуковой скорости. На нижнем участке средняя скорость волны на $210 \div 270$ м/с мень-

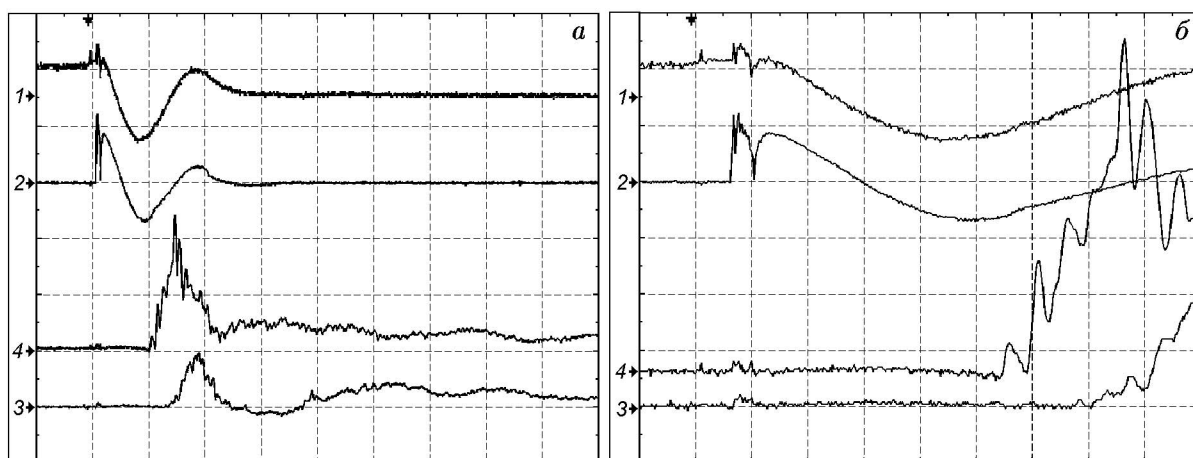


Рис. 4. Осциллограммы напряжения (луч 1), тока (луч 2) и давления (лучи 3, 4) в жидкости, $W_0 = 0.756$ кДж:

по горизонтали: a — 50 мкс/дел., b — 10 мкс/дел.; по вертикали: a , b : 1 — 10 кВ/дел., 2 — 16.5 кА/дел.; a : 3 — 27.2 МПа/дел., 4 — 23.6 МПа/дел.; b : 3 — 10.9 МПа/дел., 4 — 9.5 МПа/дел.

ше скорости звука в жидкости. Здесь передний фронт УВ более неустойчив, чем вверху (см. рис. 4, б), и понижение скорости волны можно объяснить возникновением кавитации в серии волн сжатия и разрежения на переднем фронте.

Для изучения изменения структуры УВ по мере ее распространения проведены опыты в постановке, соответствующей рис. 2, б. Характерные профили давлений УВ в верхней и нижней секциях приведены на рис. 5 (здесь уровень жидкости выше проволоочки на 107 мм). Из анализа всех полученных осциллограмм следует, что наиболее существенное изменение профиля давления УВ происходит на расстоянии ≈ 0.3 м от проволоочки (рис. 5).

Максимальное давление в ударной волне (волны I, I', I'') на датчиках D₁₂–D₁₄ соответственно составляло $30 \div 45$, $21.5 \div 2.6$ и $3 \div 5$ МПа (см. рис. 5). От нижнего пологого участка фронта волны I (датчик D₁₂, луч 2) на длине 75 мм «откалывается» волна сжатия II' (луч 3), на датчике D₁₄ она регистрируется как волна II'' (луч 4). Волна I, затухая, преобразуется в УВ I' и затем в I'', длительность УВ соответственно уменьшается с 70 до 30 и затем до 20 мкс. То есть на удалении ≈ 0.17 м от проволоочки амплитуда ударной волны I может достигать 45 МПа (длительность волны $60 \div 70$ мкс), через такое же расстояние УВ разваливается на две волны с такой же суммарной длительностью и амплитудами $3 \div 5$ МПа.

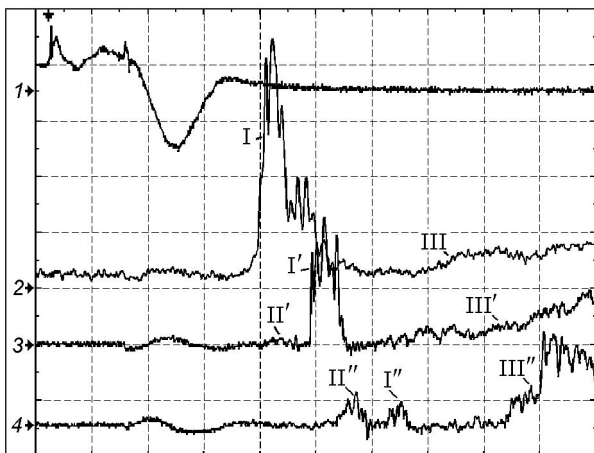


Рис. 5. Осциллограммы напряжения (луч 1) и давления в УВ в верхней секции трубы (лучи 2–4), $W_0 = 0.625$ кДж:

по горизонтали: 100 мкс/дел.; по вертикали: 1 — 10 кВ/дел., 2 — 9 МПа/дел., 3 — 9.7 МПа/дел., 4 — 5.7 МПа/дел.

Средние скорости УВ, измеренные на переднем (I, I', I'') и заднем (I' и I'') фронте, равны соответственно 1608 и 1615 м/с. Из области сжатия волн III, III' (лучи 2, 3) формируется протяженная ударная волна III'' (луч 4). Причиной затухания головной УВ (I) является возникновение кавитационных пузырьков из-за пульсаций давления за передним фронтом, а также в волне разрежения на заднем фронте УВ. Распространяясь по газожидкостной среде, волны III, III' имеют пологий фронт, волна III'' после затухания головной УВ движется уже по жидкости и отличается более крутым фронтом. На датчике D₁₄ (0.34 м от проволоочки) амплитуда ударной волны III'' составляет $7 \div 13$ МПа. Именно эта УВ регистрируется датчиками в нижней секции (рис. 6).

Из осциллограмм видно, что волна, пройдя расстояние ≈ 3 м, внизу трубы имеет достаточно высокую интенсивность (по сравнению со случаем взрыва проволоочки в газе), продолжает сохранять пульсационную структуру, профиль давления в ней меняется во времени. Длительность проходящей УВ составля-

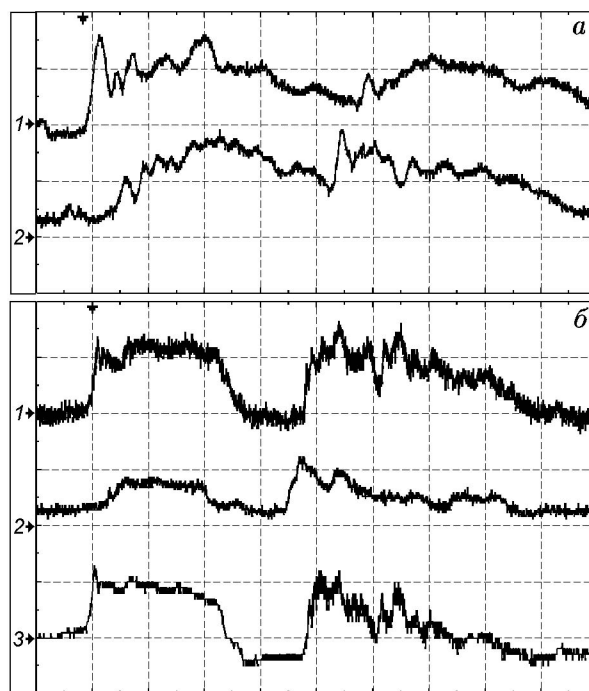


Рис. 6. Осциллограммы давления в УВ в нижней секции трубы, $W_0 = 0.625$ кДж:

по горизонтали: а — 250 мкс/дел., б — 500 мкс/дел.; по вертикали: а: 1 — 2.1 МПа/дел., 2 — 1.7 МПа/дел.; б: 1 — 1 МПа/дел., 2 — 1.7 МПа/дел., 3 — 1.7 МПа/дел.

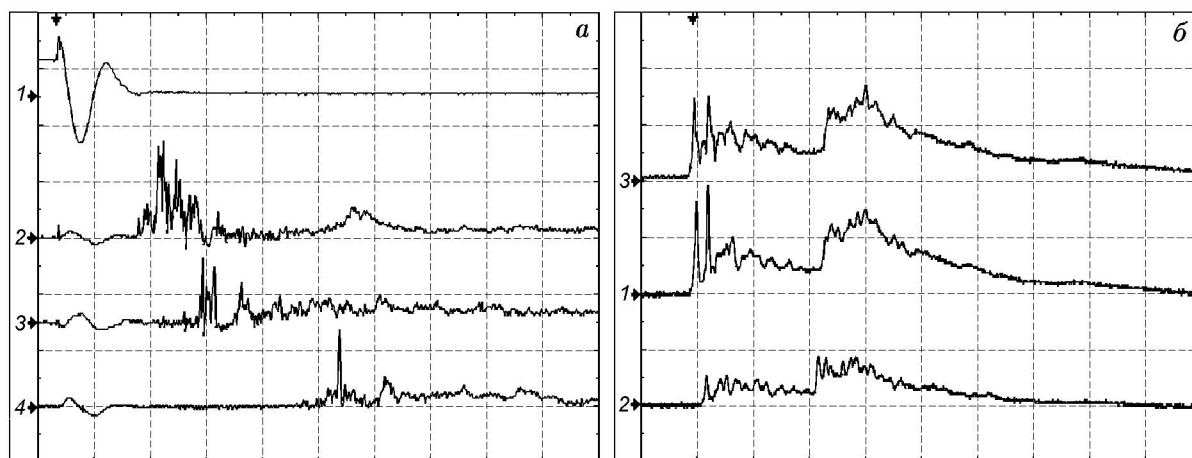


Рис. 7. Осциллограммы напряжения (*a*, луч 1) и давления в УВ в верхней (*a*, лучи 2–4) и нижней (*б*, лучи 1–3) секциях трубы, $W_0 = 0.9$ кДж, $\beta_0 = 1.15$ %:

по горизонтали: *a* — 0.1 мс/дел., *б* — 2.5 мс/дел.; по вертикали: *a*: 1 — 10 кВ/дел., 2 — 11.5 МПа/дел., 3 — 9.7 МПа/дел., 4 — 9 МПа/дел.; *б*: 1 — 0.49 МПа/дел., 2 — 0.43 МПа/дел., 3 — 0.45 МПа/дел.

ет $1 \div 1.5$ мс, амплитуда давления — $1.9 \div 2.5$ МПа, затухание волны на нижнем участке слабое. При $U_{10} = 5$ кВ на участке $D_{15}-D_{16}$ $\bar{v} = 1300 \div 1330$ м/с, при $U_{10} = 5.5$ кВ $\bar{v} = 1450 \div 1570$ м/с. Измерение скорости волны внизу трубы осложнено нестабильной пульсационной структурой волны. Например, пик, регистрируемый датчиком 11 или 15 (см. рис. 1), перемещается либо практически исчезает на датчике 16, все пики давления постоянно смещаются в волне. На переднем фронте волны также сложно рассчитать скорость, поскольку крутизна и профиль фронта давления меняются: от волны отходят быстрые возмущения давления (регистрируемые на D_{15}), которые вблизи D_{16} (на базе 170 мм) успевают затухнуть. По этим причинам разброс нескольких измеренных значений средней скорости может достигать 100 м/с.

Отраженная от торца трубы УВ на расстоянии более 0.5 м сохраняет пульсационную структуру, ее скорость и среднее давление на фронте практически не меняются, затухание УВ слабое (рис. 6, б). Профиль давления в отраженной волне преобразуется из прямоугольного (для падающей волны) в треугольный.

Определение скорости и давления на фронте ударных волн в жидкости, созданных посредством взрыва проволочек, сопряжено с трудностями, обусловленными затуханием коротких волн сжатия и нестабильностью структуры волны. Тем не менее независимо от ам-

плитуды и профиля давления волны скорость УВ оказывается близкой к скорости звука в жидкости. Поэтому значения средних и мгновенных скоростей УВ в жидкости практически совпадают.

Ударная волна в инертной пузырьковой среде

Изменения объемной концентрации пузырьков в диапазоне $\beta_0 = 0.8 \div 4.1$ % и запасенной энергии в интервале $W_0 = 0.44 \div 1.60$ кДж не приводят к качественному изменению профилей давления УВ, созданных взрывом проволочек. Характерные осциллограммы давлений вверху и внизу трубы приведены на рис. 7, опыты выполнены в постановке рис. 2, б, электроды расположены выше верхнего датчика давления на 168 мм.

В пузырьковой среде пульсации давления в УВ выражены сильнее, чем в жидкости. Вблизи от места взрыва проволочки регистрируется двухволновая структура (см. рис. 7, а, луч 2), длительность передней, более мощной волны около 100 мкс. Пульсации давления в УВ соответствуют пульсациям пузырьков, их максимальная амплитуда зависит от энергии взрыва и расстояния от пузырьков до датчиков. В первой волне амплитуда пульсаций давления гораздо выше, чем во второй, поскольку, испытав 2–3 колебания, первоначальные пузырьки разваливаются на более мелкие размером $\leq 0.1 \div 0.5$ мм [4]. С удалением от проволочки

первая волна постепенно замедляет скорость, а вторая волна почти догоняет первую на расстоянии 0.3 м от места взрыва.

На рис. 7,б приведен профиль давления УВ в пузырьковой среде в нижней секции трубы. Обращает на себя внимание увеличение длительности падающей УВ с $0.5 \div 1.0$ мс сверху трубы до более чем 10 мс внизу трубы. Отраженная от нижнего торца трубы ударная волна движется по газожидкостной среде с разрушенными мелкими пузырьками, пульсации давления в ней выражены гораздо слабее, чем в падающей УВ.

Скорость и амплитуда давления в падающей УВ зависят от энергии, выделяющейся при разряде конденсатора на проволочке, и от концентрации пузырьков. При одинаковых параметрах газожидкостной среды и энергии W_0 средняя скорость волны в нижней секции примерно в два раза меньше скорости в верхней секции.

В таблице приведены значения амплитуды давления Δp_{12} и среднего давления (на «полочке») $\Delta \bar{p}_{15}$, измеренные датчиками 12 и 15 соответственно (см. рис. 1) при $W_0 = 0.625 \div 1.6$ кДж ($\Delta p_i = p_i - p_1$, где p_1 — давление перед волной с учетом высоты столба жидкости). При этом амплитуда отдельных пиков давления может на $50 \div 100$ % превышать «полочку» на датчике 15.

С ростом W_0 возрастает амплитуда давления УВ, но наибольшее влияние на нее оказывает изменение β_0 . При уменьшении объемной концентрации пузырьков амплитуда давления УВ возрастает и при $\beta_0 = 1$ % становится близкой к давлению в жидкости. Например, при $W_0 = 0.625$ кДж скачок давления УВ в жидкости составляет $35 \div 36$ МПа в верхней секции измерения и $1.7 \div 4$ МПа в нижней секции. По сравнению с жидкостью в пузырьковой среде амплитуда УВ затухает сильнее и степень за-

тухания $\Delta p_{12}/\Delta \bar{p}_{15}$ увеличивается с уменьшением концентрации пузырьков (см. таблицу).

О проблемах измерения скорости УВ

Обычно считается, что из эксперимента известны амплитуды УВ и время прохождения волны через датчики давления, находящиеся друг от друга на заданном расстоянии L . Исходя из этого вычисляют среднюю скорость УВ на участке длины между датчиками, затем ее сравнивают с рассчитанной по какой-либо теоретической формуле.

В газожидкостной среде скорость и давление УВ убывают с расстоянием заметно быстрее, чем в жидкости. Поэтому сравнение средней скорости затухающей УВ, полученной из эксперимента, с ее мгновенным значением, рассчитанным по теоретической зависимости для стационарной волны, является методологической ошибкой. Трудности теоретического описания нестационарных УВ связаны с проблемой учета потерь, которые существуют не только в ударной трубе, но и в безграничной среде из-за наличия вязкости жидкости, неустойчивости границы пузырьков и их разрушения.

При проведении эксперимента возникают трудности, связанные с измерением средней скорости УВ, особенно при малой концентрации пузырьков. Наличие пологого фронта и нестабильной структуры волны не позволяют точно выбрать время «начала» волны, т. е. однозначно определить на осциллограмме моменты времени t_2 и t_1 . Часто, когда профиль волны не сохраняет подобие, для точки 1 с давлением p_1 , взятой, например, на половине высоты волны для первого датчика, можно выбрать либо точку 2 с давлением p_2 , либо точку 3 с давлением p_3 на втором датчике (см. рис. 8,а).

Если использовать теоретическую формулу для расчета скорости стационарной УВ, то правильнее на осциллограмме выбрать такие значения t_1 и t_2 , при которых давление УВ выходит на некоторую «полочку» — давления p_1 и p_2 соответственно (рис. 8,б).

Малой концентрации пузырьков ($\beta_0 \approx 1$ %) свойственна большая неоднородность распределения пузырьков по объему, вследствие чего на отдельных участках ударная волна движется по жидкости. Поэтому погрешность измерения средней скорости УВ при малых концентрациях возрастает. Измерение значения \bar{v} еще более затруднено в области, распо-

Зависимость амплитуды давления УВ от объемной концентрации пузырьков в верхней и нижней секциях измерения

$\beta_0, \%$	$\Delta p_{12}, \text{МПа}$	$\Delta \bar{p}_{15}, \text{МПа}$	$\Delta p_{12}/\Delta \bar{p}_{15}$
1 ± 0.1	$34 \div 56$	$0.49 \div 0.75$	$70 \div 75$
2 ± 0.2	$12 \div 25$	$0.28 \div 0.39$	$43 \div 65$
3 ± 0.2	$5.7 \div 10.7$	$0.25 \div 0.34$	$23 \div 31$
4 ± 0.1	$5 \div 10$	$0.2 \div 0.31$	$25 \div 32$

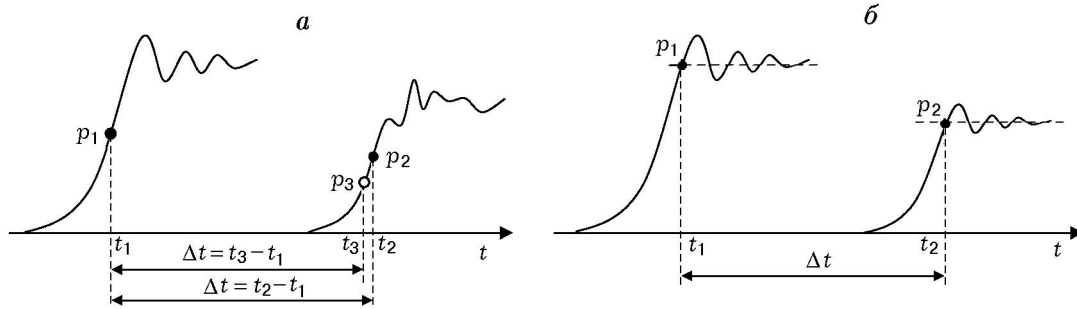


Рис. 8. Профиль давления нестационарной УВ в пузырьковой среде (пояснение к проблеме измерения скорости УВ)

ложенной близко к месту взрыва проволочки. Причина этого заключается в том, что в исследуемом диапазоне энергий W_0 на расстоянии до $0.3 \div 0.5$ м ударная волна является сильной и в ней происходит разрушение пузырьков. Длительность такой волны мала, профиль давления отличается от прямоугольного, волна не имеет четко выраженного начала фронта и на длине секции измерения изменяется. Поэтому сравнение экспериментальных значений \bar{v} с теорией проводили на большом удалении от проволочки.

Для сравнения теории с экспериментом в данной работе предложено вычислять зависимость спада давления от расстояния $p(x)$. Для расчета $p(x)$ были использованы данные с трех датчиков p_1 , p_2 и p_3 в нижней секции трубы. Лучшей зависимостью, описывающей спад давления, оказалась степенная функция вида $p(x) = p_0(x/l)^n$, где p_0 , l , n — константы, определяемые для каждого опыта. Далее функцию $p(x)$ использовали в теоретической формуле для вычисления зависимости $v(x)$, по которой затем рассчитывали среднюю скорость \bar{v}_L и сопоставляли ее с экспериментальной скоростью \bar{v} . Схематически эту процедуру можно представить в следующем виде:

$p_1, p_2, p_3 \rightarrow$

$$\rightarrow p(x) \rightarrow v(p(x)) \rightarrow v(x) \rightarrow \bar{v}_L \rightarrow \bar{v}. \quad (1)$$

Для расчета зависимости $v(x)$ были выбраны теоретические формулы, полученные на основе различных моделей. Скорость ударной волны v в [6] выведена в адиабатическом приближении:

$$v^2 = \frac{p - p_1}{\rho} \left[1 - \beta_0 \left(\frac{p}{p_1} \right)^{-1/\gamma} - \right.$$

$$\left. - (1 - \beta_0) \left(1 + \gamma_2 \frac{p - p_1}{\rho c_l^2} \right)^{-1/\gamma_2} \right]^{-1}, \quad (2)$$

где p — давление на фронте УВ, ρ — плотность газожидкостной смеси, γ — показатель адиабаты газа, γ_2 — показатель «адиабаты» жидкости. В [7] решена аналогичная задача в предположении изотермичности процесса, поэтому рассматриваются уравнения сохранения массы и импульса, а для учета сжимаемости жидкости использовано акустическое приближение:

$$v^2 = \frac{p - p_1}{\rho} \left[1 - \beta_0 \frac{p_1}{p} - \right. \\ \left. - (1 - \beta_0) \left(1 + (1 - \beta_0) \frac{p - p_1}{\rho c_l^2} \right)^{-1} \right]^{-1}. \quad (3)$$

В [8] в рамках двухтемпературной и двухскоростной модели получено выражение

$$v^2 = c_0^2 \frac{p}{p_1} \times \\ \times \frac{1 + \beta_0 (1 - \beta_0) (p/p_1 - 1) (c_l/c_0)^{-2}}{(1 + \bar{x}_{20}) \left[1 + (1 - \beta_0) (p/p_1 - \beta_0) (c_l/c_0)^{-2} \right]}, \quad (4)$$

где $c_0 = \sqrt{p_1/[\rho_{l0}\beta_0(1-\beta_0)]}$ — замороженная скорость звука в газожидкостной среде, \bar{x}_{20} — отношение массы газа к массе жидкости.

В опытах с фиксированной концентрацией β_0 скорость УВ в нижней секции зависела от величины запасенной энергии W_0 . Сравнение экспериментальных средних скоростей ударных волн при $W_0 = 1.6$ кДж с теоретическими значениями, вычисленными по процедуре (1), иллюстрирует рис. 9.

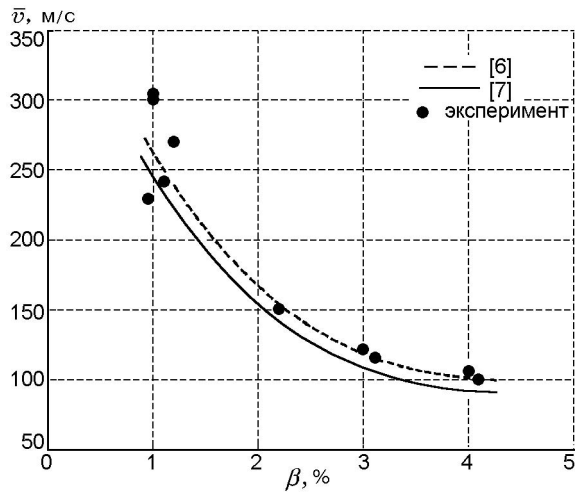


Рис. 9. Экспериментальные и теоретические значения скорости ударной волны в зависимости от объемной концентрации пузырьков, $W_0 = 1.6 \text{ кДж}$

Расчеты скорости УВ по формулам (3) и (4) практически совпадают. Наиболее близкие значения скорости УВ к экспериментальным дает формула (2). Различие скоростей, вычисленных по приведенным формулам, не превышает 20 м/с. При этом погрешность измерения скорости меньше 10 %. При $\beta_0 = 1 \%$ разброс экспериментальных скоростей связан не с погрешностью измерения, а с неоднородностью среды.

Несмотря на близость экспериментальных и теоретических значений средней скорости УВ, нельзя сделать вывод о достоверности используемых формул, так как при их выводе волну считали стационарной (без потерь).

Иницирование пузырьковой детонации взрывом проволочки

Опыты проведены в диапазоне $\beta_0 = 1 \div 4 \%$ с газовой смесью $\text{C}_2\text{H}_2 + 2.5\text{O}_2$ в постановке, представленной на рис. 2, б. Характерные осциллограммы давления и свечения в вол-

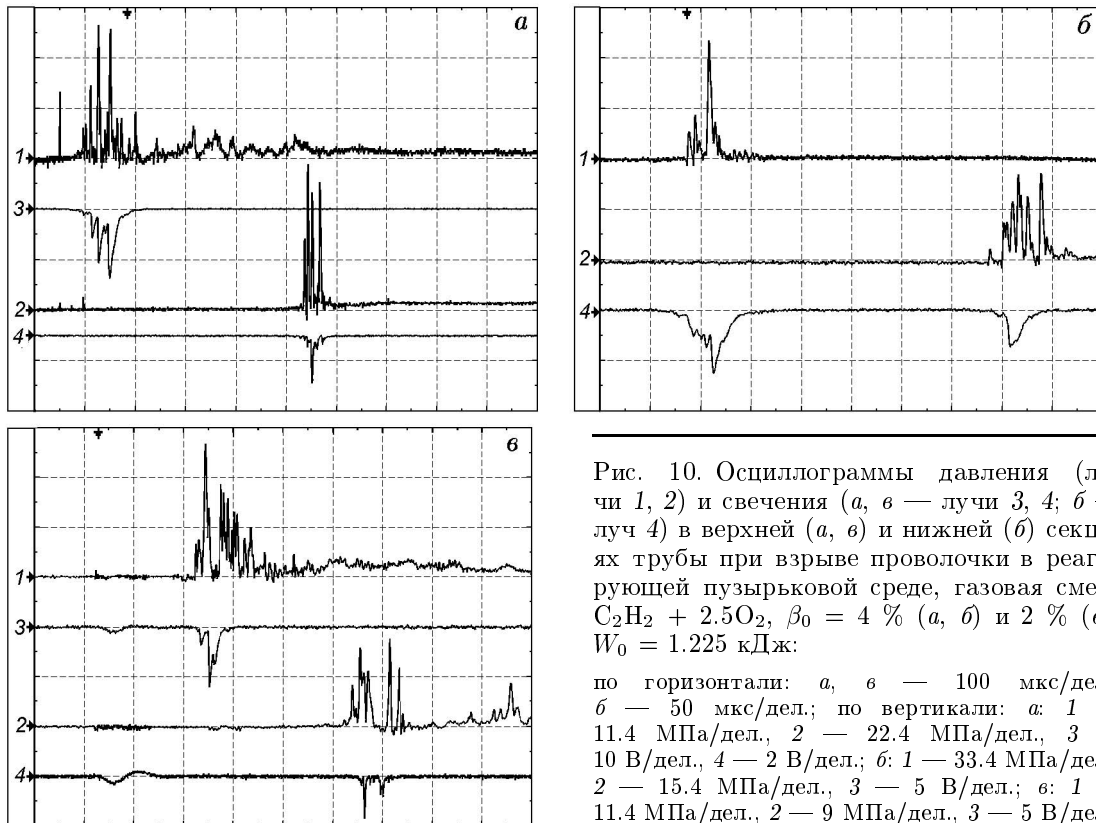


Рис. 10. Осциллограммы давления (лучи 1, 2) и свечения (а, в — лучи 3, 4; б — луч 4) в верхней (а, в) и нижней (б) секциях трубы при взрыве проволочки в реагирующей пузырьковой среде, газовая смесь $\text{C}_2\text{H}_2 + 2.5\text{O}_2$, $\beta_0 = 4 \%$ (а, б) и 2% (в, г), $W_0 = 1.225 \text{ кДж}$:

по горизонтали: а, в — 100 мкс/дел., б — 50 мкс/дел.; по вертикали: а: 1 — 11.4 МПа/дел., 2 — 22.4 МПа/дел., 3 — 10 В/дел., 4 — 2 В/дел.; б: 1 — 33.4 МПа/дел., 2 — 15.4 МПа/дел., 3 — 5 В/дел.; в: 1 — 11.4 МПа/дел., 2 — 9 МПа/дел., 3 — 5 В/дел., 4 — 1 В/дел.

нах сжатия, распространяющихся при взрыве проволоочки в реагирующей пузырьковой среде, даны на рис. 10. Здесь электроды расположены выше датчика D_{12} на 168 мм, оптические вводы фотоэлектронных умножителей находятся напротив пьезодатчиков.

При подрыве проволоочки образуется пережатая волна пузырьковой детонации длительностью $100 \div 150$ мкс с множественными пульсациями амплитудой $20 \div 70$ МПа и свечением пузырьков ближе к началу волны (рис. 10, а). По мере распространения в верхней секции она преобразуется в стационарную волну детонации — профиль давления становится ближе к коноидальному. Волна пузырьковой детонации в дальнейшем не меняет профиль давления и скорость и является самоподдерживающейся (рис. 10, б). Начало отделения волны детонации от инициирующей волны иллюстрирует рис. 10, в. Следующие за волной ПД короткие волны сжатия распространяются уже по прореагировавшей среде и быстро затухают.

Скорость стационарной детонационной волны D не зависит от запасенной энергии W_0 . Результаты измерения скорости при различной объемной концентрации β_0 показывают, что из-за неоднородности среды при $\beta_0 = 1\%$ наблюдается разброс в измерениях скорости волны детонации как в верхней секции трубы, так и в нижней.

Отметим, что традиционные одномерные модели, описывающие ударные и детонационные волны в однородных пузырьковых сре-

дах, требуют существенной корректировки для описания волновых процессов в неоднородных средах (например, при малых значениях β_0). В этих случаях могут быть полезны работы [9–11], где численно решены двумерные задачи о распространении волн в пузырьковых средах с изменяющимся сечением канала или непостоянной концентрацией газовой фазы по длине или сечению канала.

Полученные данные (рис. 11) близки к измеренным значениям скорости волны ПД в работах [1–5], где инициирование детонации осуществлялось протяженной УВ, создаваемой при подрыве горючей газовой смеси в секции инициирования. Иницирование короткой УВ от взрыва проволоочки подтверждает независимый от способа инициирования характер распространения волны пузырьковой детонации.

ВЫВОДЫ

Показано, что при взрыве проволоочки в жидкости создается короткая УВ, затухающая на расстоянии 0.3 м, за которой из области сжатия формируется ударная волна с нестационарным пульсирующим профилем давления.

В инертной пузырьковой среде регистрируется затухание УВ, что делает невозможным прямое сравнение экспериментальной средней скорости УВ с теоретической мгновенной скоростью, полученной для стационарной УВ. Для сопоставления теории и эксперимента предложена процедура вычисления средней скорости УВ, в которой используется экспериментальная аппроксимация спада амплитуды давления от расстояния.

Установлена возможность инициирования пузырьковой детонации короткими волнами от взрыва проволоочки в газожидкостной среде. Показано, что инициирующая волна выходит на стационарный самоподдерживающийся режим на длине, не превышающей 0.3 м. Скорость детонации определяется параметрами газожидкостной среды и не зависит от энергии инициирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сычев А. И., Пинаев А. В. Волна детонации в системах жидкость — пузырьки газа // Первый Всесоюз. симпоз. по макроскопической кинетике и химической газодинамике, Алма-Ата, 1984: тез. докл. — Черногловка, 1984. — Т. 1, ч. 1. — № 65. — С. 54–55.

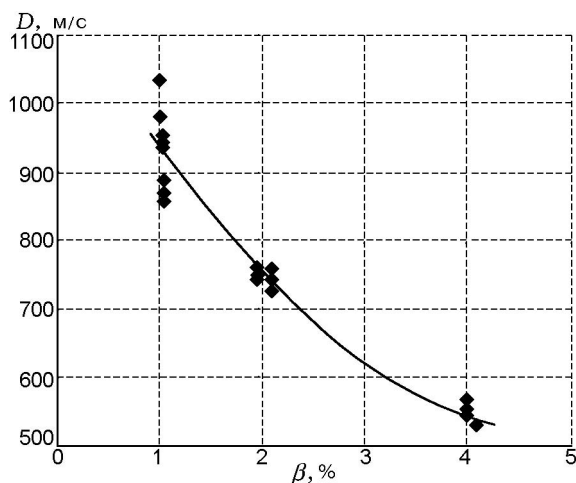


Рис. 11. Результаты измерения скорости стационарной волны пузырьковой детонации в нижней секции трубы, $W_0 = 0.44 \div 1.60$ кДж

2. Сычев А. И., Пинаев А. В. Самоподдерживающаяся детонация в жидкостях с пузырьками взрывчатого газа // ПМТФ. — 1986. — № 1. — С. 133–138.
3. Пинаев А. В., Сычев А. И. Обнаружение и исследование самоподдерживающихся режимов детонации в системах жидкое горючее — пузырьки окислителя // Докл. АН СССР. — 1986. — Т. 290, № 3. — С. 611–615.
4. Пинаев А. В., Сычев А. И. Структура и свойства детонации в системах жидкость — пузырьки газа // Физика горения и взрыва. — 1986. — Т. 22, № 3. — С. 109–118.
5. Пинаев А. В., Сычев А. И. Влияние физико-химических свойств газа и жидкости на параметры и условия существования волны детонации в системах жидкость — пузырьки газа // Физика горения и взрыва. — 1987. — Т. 23, № 6. — С. 76–84.
6. Ляхов Г. М. Ударные волны в многокомпонентных средах // Изв. АН СССР. ОТН. Механика и машиностроение. — 1959. — № 1.
7. Бэтчелор Г. К. Волны сжатия в суспензии газовых пузырьков в жидкости // Механика: сб. переводов. — 1968. — № 3 (109). — С. 65–84.
8. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. — М.: Наука, 1987. — Ч. II.
9. Galimzyanov M. N., Gimaltdinov I. K., Shagapov V. Sh. Two-dimensional pressure waves in a fluid with bubbles // Fluid Dynamics. — 2002. — V. 37, N 2. — P. 294–301.
10. Шагапов В. Ш., Гималтдинов И. К., Баязитова А. Р., Спевак Д. С. Распространение детонационных волн вдоль трубчатого пузырькового кластера, находящегося в жидкости // Теплофизика высоких температур. — 2009. — Т. 47, № 3. — С. 448–456.
11. Баязитова А. Р., Гималтдинов И. К., Шагапов В. Ш. Волны давления в трубе, заполненной пузырьковой смесью с неоднородным распределением по сечению // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. — 2006. — № 3. — С. 67–78.

Поступила в редакцию 21/III 2011 г.
