

Ударные и детонационные волны в пузырьковых средах при взрыве проволоочки

А.В. Пинаев, И.И. Кочетков

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

e-mail: avpin@ngs.ru, kii@hydro.nsc.ru

Проведены измерения параметров ударных волн при взрыве проволоочек в пузырьковых инертных и реагирующих средах в вертикальной ударной трубе. Обсуждаются проблемы измерения скорости ударных волн в пузырьковой инертной среде, проведено сравнение экспериментальных данных с теоретическими расчетами. Для сред с пузырьками химически активного газа исследовано инициирование самоподдерживающейся детонации взрывом проволоочки. Проведено сравнение экспериментальных и расчетных профилей давления волны пузырьковой детонации.

Введение. В работах [1-4] в химически активной пузырьковой среде обнаружена и подробно исследована самоподдерживающаяся пузырьковая детонация ПД. Пузырьковую детонацию инициировали волной газовой детонации, падающей сверху на поверхность пузырьковой среды. При таком способе инициирования от протяженной волны сжатия в газожидкостной среде отделялась волна ПД коноидальной формы длительностью 50-70 мкс с пульсациями давления, соответствующими осцилляциям сгоревших пузырьков. С уменьшением вязкости жидкой фазы расстояние, на котором происходило отделение волны ПД, возрастало до нескольких метров, что создавало трудности в ее исследовании.

Для сокращения времени формирования волны ПД в работе предложено исследовать инициирование процесса непосредственно в пузырьковой среде короткими волнами сжатия с длительностью, близкой к длительности волны пузырьковой детонации. Необходимо выяснить возможность возбуждения пузырьковой детонации взрывом проволоочки в газожидкостной среде и сравнить результаты опытов с расчетами по модели авторов.

Экспериментальная установка, методика измерений. Эксперименты проводили на вертикальной ударной трубе диаметром 35 мм и длиной 4.5 м. Параметры волн измеряли в сечениях 1, 2, расстояние между которыми составляло 3 м. Сверху трубы крепили подвижные медные электроды диаметром 3 мм, снизу которых припаивали проволоочку из манганина длиной 9÷12 мм и сопротивлением 0.26÷0.35 Ом. Конденсатор емкостью $C_1 = 50$ мкФ заряжали до напряжения $U_{10} = 4\div 8$ кВ, (запасенная энергия $W_0 = 0.44\div 1.60$ кДж) амплитуда разрядного тока в цепи составляла соответственно $I = 9\div 18$ кА, выделившаяся энергия в проволочке $W_1 = 0.286\div 1.040$ кДж (коэффициент передачи энергии в проволочку $W_1/W_0 = 67.5\%$).

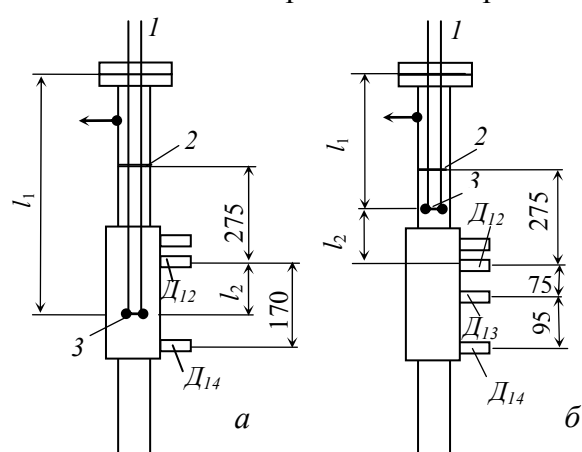


Рис. 1. Принципиальная схема размещения электродов вверху трубы. 1 – электроды, 2 – уровень жидкости, 3 – проволоочка, Д₁₂÷Д₁₄ – пьезодатчики.

Эксперименты проводили на вертикальной ударной трубе диаметром 35 мм и длиной 4.5 м. Параметры волн измеряли в сечениях 1, 2, расстояние между которыми составляло 3 м. Сверху трубы крепили подвижные медные электроды диаметром 3 мм, снизу которых припаивали проволоочку из манганина длиной 9÷12 мм и сопротивлением 0.26÷0.35 Ом. Конденсатор емкостью $C_1 = 50$ мкФ заряжали до напряжения $U_{10} = 4\div 8$ кВ, (запасенная энергия $W_0 = 0.44\div 1.60$ кДж) амплитуда разрядного тока в цепи составляла соответственно $I = 9\div 18$ кА, выделившаяся энергия в проволочке $W_1 = 0.286\div 1.040$ кДж (коэффициент передачи энергии в проволочку $W_1/W_0 = 67.5\%$). Коэффициент передачи энергии в ударную волну в жидкости $W_2/W_0 \approx 20\%$. Ток измеряли на шунте сопротивлением 8.5 мОм. В качестве жидкости в трубе использовали смесь 0.75 Н₂О+0.25 глицерина (скорость звука $c_{ж} = 1600$ м/с), в качестве газов в пузырьках – воздух, либо смесь $C_2H_2+2.5O_2$. Снизу трубы располагался генератор пузырьков из тонких трубочек, создающих пузырьки диаметром 3-4 мм. Схема размещения электродов в верхней секции, а также расстояния между датчиками приведены на рис. 1.

Давление измеряли турмалиновыми либо пьезокерамическими (ЦТС-19) датчиками с собственной частотой 300 кГц. Свечение в пузырьковых средах регистрировали фотоумно-

жителями, световые вводы которых были установлены напротив пьезодатчиков.

Результаты экспериментов. Ударная волна в жидкости. Постановка эксперимента соответствует рис. 1, а. Время от начала разряда до момента разрыва проволоочки (когда резко падает ток) составляет $3.3 \div 4.1$ мкс. Начало расширения плазменного пузыря соответствует моменту резкого падения тока в электрической цепи. Средние скорости на участках l_2 проволоочка – датчик D_{12} и l_{14} проволоочка – датчик D_{14} равны соответственно 1819 и 1346 м/с.

По результатам 7-ми опытов для УВ на участках l_2 и l_{14} соответственно $\bar{V} = 1580 \div 1820$ и $1330 \div 1390$ м/с. Максимальное давление волны на нижнем датчике находится в пределах $30.0 \div 55.0$ МПа, на верхнем – $17.0 \div 34.0$ МПа. В связи с затуханием волны и большей удаленностью верхнего датчика амплитуда давления на нем примерно в два раза ниже, чем на нижнем датчике. Вверх волна движется со скоростью, близкой или даже превышающей $c_{ж}$ на 100-200 м/с, что объясняется разгоном границы расширяющейся полости до сверхзвуковой скорости. На нижнем участке средняя скорость волны на 210-270 м/с меньше скорости звука в жидкости. Здесь передний фронт УВ более неустойчив, чем сверху и понижение скорости волны можно объяснить возникновением кавитации в серии волн сжатия и разрежения на переднем фронте.

Из анализа осциллограмм опытов, выполненных в постановке рис. 1, б, следует, что наиболее существенное изменение профиля давления УВ происходит вблизи проволоочки. Характерные профили давлений УВ в секциях 1, 2 приведены на рис. 2, здесь $l_1 = 495$ мм, $l_2 = 168$ мм, уровень жидкости выше проволоочки на 107 мм.

Максимальное давление в УВ (волны 1, 1', 1'') на датчиках $D_{12} \div D_{14}$ соответственно составляло $30.0 \div 45.0$, $21.5 \div 2.0$, и $3.0 \div 5.0$ МПа (рис. 3, а). От переднего пологого фронта волны 1 (датчик D_{12} , луч 2) на длине 75 мм «откалывается» волна 2' (луч 3), на датчике D_{14} она регистрируется как волна 2'' (луч 4). Волна 1, затухая, преобразуется в волну 1' и затем в 1'', длительность УВ соответственно уменьшается с 70 до 30 и затем до 20 мкс.

Средняя скорость УВ по переднему фронту (1, 1', 1'') равна 1608 м/с. Из области сжатия 3, 3' (лучи 2 и 3) формируется ударная волна 3'' (луч 4). Причиной затухания головной УВ

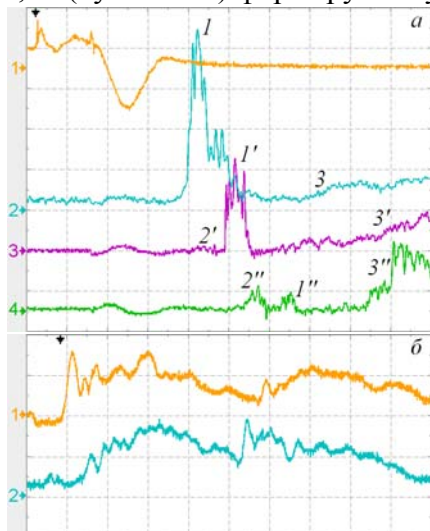


Рис. 2. Осциллограммы напряжения U_1 (луч 1, а) и давлений в УВ в секциях 1 (а) и 2 (б, в), $U_{10} = 5$ кВ, по горизонтали: 100 (а), 250 (б), 500 (в) мкс/дел. По вертикали: а) 1 – 10 кВ/дел, 2 – 22.4 МПа/дел, 3 – 9.7 МПа/дел, 4 – 5.7 МПа/дел; б) 1 – 2.1 МПа/дел, 2 – 1.7 МПа/дел.

является возникновение кавитационных пузырьков. Распространяясь по газожидкостной среде, волны 3, 3' имеют пологий фронт, волна 3'' после затухания головной УВ движется уже по жидкости и имеет более крутой фронт. На датчике D_{14} (34 см от проволоочки) амплитуда ударной волны 3'' составляет $7.0 \div 13.0$ МПа. Именно эта ударная волна регистрируется датчиками в нижней секции 7 (см. рис. 2, б).

Волна, пройдя расстояние около 3 м, внизу трубы продолжает сохранять пульсационную структуру, профиль давления в ней меняется во времени. Длительность проходящей УВ составляет 1-1.5 мс, амплитуда давления – 1.9-2.5 МПа, затухание волны слабое. При напряжении 5 кВ на участке $D_{15} - D_{16}$ $\bar{V} = 1300-1330$ м/с, при 5,5 кВ $\bar{V} = 1450-1570$ м/с. Измерение скорости волны внизу трубы осложнено нестабильной пульсационной структурой волны. Все пики давления постоянно смещаются в волне, от волны отходят быстрые возмущения давления (регистрируемые на D_{16}), которые на D_{17} (на базе 170 мм) успевают затухнуть. По этим причинам разброс измерений нескольких значений \bar{V} может достигать 150 м/с ($\bar{V} = 1450 \pm 150$ м/с).

Отраженная УВ на расстоянии более 0.5 м от торца трубы сохраняет пульсационную структуру. Ее скорость и давление на фронте практически не меняются, затухание слабое. Определение скорости и давления на фронте ударных волн в жидкости, созданных посредством взрыва проволочек, сопряжено с трудностями, обусловленными нестабильностью структуры волны, затуханием коротких волн сжатия.

Ударная волна в инертной пузырьковой среде. Изменения объемной концентрации пузырьков в диапазоне $\beta_0 = 0.8 \div 4.1\%$ и напряжения $U_{10} = 5 \div 8$ кВ не оказывают качественного влияния на профили давления в ударных волнах, созданных взрывом проволочек. Характерные осциллограммы давлений вверху и внизу трубы приведены на рис. 3, здесь электроды расположены выше верхнего датчика на 10.7 см.

В пузырьковой среде пульсации давления в ударных волнах выражены сильнее, чем в жидкости. Вблизи от места взрыва проволочки регистрируется двухволновая структура (см. рис. 3, *а*, луч 2), передняя, более мощная волна имеет длительность около 100 мкс. Пульсации давления соответствуют пульсациям пузырьков, их максимальная амплитуда зависит от энергии взрыва и от расстояния пузырьков до пьезодатчиков. В первой волне амплитуда пульсаций давления гораздо выше, чем во второй, поскольку, испытав 2-3 колебания, первоначальные пузырьки разваливаются на более мелкие с размерами $\leq 0.1-0.5$ мм [3]. С удалением от проволочки первая волна постепенно замедляет скорость, вторая волна догоняет ее на расстоянии 0.3 м от места взрыва.

На рис. 3, *б* приведен профиль давления ударных волн в пузырьковой среде в нижней секции измерения. Обращает на себя внимание увеличение длительности падающей УВ с 0.7-1.0 мс вверху трубы до величины, большей 10 мс внизу трубы. Отраженная УВ здесь движется по газожидкостной среде с разрушенными мелкими пузырьками, пульсации давления в ней выражены слабее, чем в падающей волне. Скорость и амплитуда давления

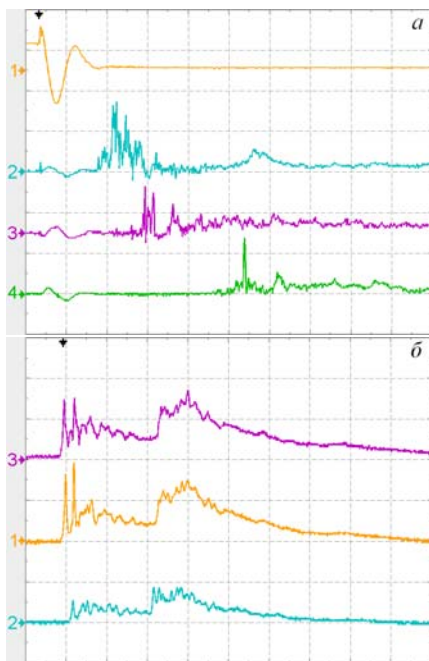


Рис. 3. Осциллограммы напряжения U_1 (луч 1, *а*) и давлений в УВ в верхней (*а*) и нижней (*б*) секциях измерений, $U_{10} = 6$ кВ, $\beta_0 = 1.15\%$, по горизонтали: 0.1 (*а*), 2.5 (*б*) мс/дел.

По вертикали: *а*) 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.

в падающей УВ зависят от W_0 и β_0 . При одинаковых параметрах газожидкостной среды и U_{10} скорость \bar{V} в нижней секции 2 примерно в 2 раза меньше скорости в секции 1.

Малой концентрации пузырьков ($\beta_0 \sim 1\%$) характерна большая неоднородность распределения пузырьков по объему, что приводит к тому, что на отдельных участках УВ переходит из газожидкостной среды в жидкость и обратно. Напротив, в нижней части трубы, УВ имеет более сглаженный пульсационный профиль с четко различимым фронтом нарастания давления и небольшими пульсациями.

Из эксперимента следует, что УВ в пузырьковой среде нестационарна – давление и скорость на длине секции 2 затухает на 20-40% и 10-20% соответственно в зависимости от β_0 . Как правило, теория дает значения мгновенной скорости стационарных УВ в зависимости от ее амплитуды. Для нестационарных УВ теоретические трудности связаны с проблемой учета потерь. Потери в УВ волне существуют даже в безграничной среде из-за наличия вязкости жидкости, неустойчивости границы пузырьков и их разрушения.

Считается, что в эксперименте из осциллограмм известны амплитуды УВ и время прохождения волны через датчики давления на расстоянии L . Исходя из этого, вычисляют среднюю скорость УВ между датчиками $\bar{V} = L/(t_2 - t_1) = L/\Delta t$, затем \bar{V} сравнивают с теоретической формулой. Но сравнение средней экспериментальной

ной скорости с её мгновенным теоретическим значением является методологической ошибкой. Кроме того, существуют проблемы, связанные с измерением \bar{V} .

Наличие пологого фронта и нестабильной структуры УВ не позволяет точно выбрать время «начала волны» или однозначно определить на осциллограмме моменты времени t_2 и t_1 . Так для точки «1» с давлением P_1 , взятой 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. 4, а).

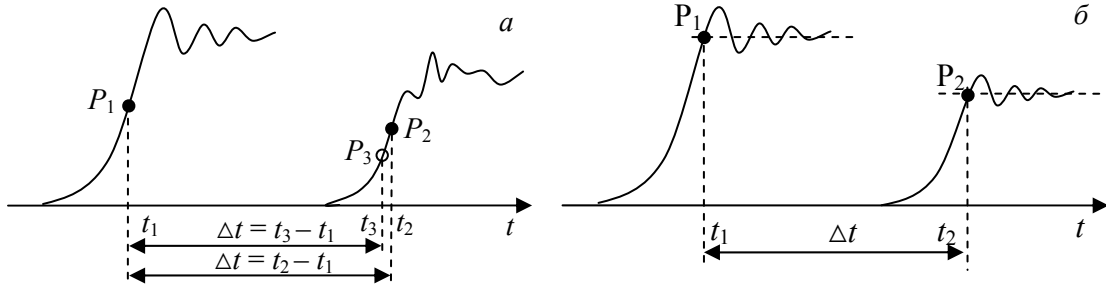


Рис. 4. Профиль давления нестационарной УВ в пузырьковой среде (пояснение к проблеме измерения скорости).

При использовании теоретической формулы для расчета скорости УВ правильной на осциллограмме выбрать такие t_1 и t_2 , при которых давление выходит на некоторые осредненные полочки P_1 и P_2 (см. рис. 4, б), а не соответствует точкам на половине амплитуды волны или первому пику.

Для сравнения теории с экспериментом в работе предложено вычислять зависимость спада давления от расстояния $P(x)$. Для расчета $P(x)$ были использованы данные с трех нижних датчиков. 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 $P(x)$ 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 эта процедура имеет вид:

$$P_1, P_2, P_3 \rightarrow P(x) \rightarrow V(P(x)) \rightarrow V(x) \rightarrow \bar{V}_L \rightarrow \bar{V} \quad (1)$$

Скорость ударной волны V в [6] получена для случая адиабатического приближения:

$$V^2 = \frac{p_2 - p_1}{\rho} \left(1 - \beta_0 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{-1/\gamma} - (1 - \beta_0) \left[1 + \gamma_2^* \frac{p_2 - p_1}{\rho c_{ж}^2} \right]^{-1/\gamma_2^*} \right)^{-1}, \quad (2)$$

где p_1, p_2 – давления до и после УВ, ρ – плотность газожидкостной смеси, γ – показатель адиабаты газа, γ_2^* – показатель «адиабаты» жидкости. В [7] решена аналогичная задача в предположении об изотермичности процесса, поэтому рассматриваются уравнения сохранения массы и импульса, для учета сжимаемости жидкости использовано акустическое приближение:

$$V^2 = \frac{p_2 - p_1}{\rho} \left(1 - \beta_0 \frac{p_1}{p_2} - (1 - \beta_0) \left(1 + (1 - \beta_0) \frac{p_2 - p_1}{\rho c_{ж}^2} \right)^{-1} \right)^{-1}. \quad (3)$$

В [5] в рамках двухтемпературной и двухскоростной модели получено выражение:

$$V^2 = c_0^2 \frac{p_2}{p_1} \frac{1 + \beta_0 (1 - \beta_0) (p_2/p_1 - 1) (c_{ж}/c_0)^{-2}}{(1 + \bar{x}_{20}) \left(1 + (1 - \beta_0) (p_2/p_1 - \beta_0) (c_{ж}/c_0)^{-2} \right)}, \quad (4)$$

где $c_0 = \sqrt{p_1 / (\rho_{ж0} \beta_0 (1 - \beta_0))}$ – замороженная скорость звука в газожидкостной среде, \bar{x}_{20} – отношение массы газа к массе жидкости.

В опытах с фиксированной β_0 скорость УВ в нижней секции 2 зависела от величины запасенной энергии W_0 . Сравнение экспериментальных средних скоростей ударных волн

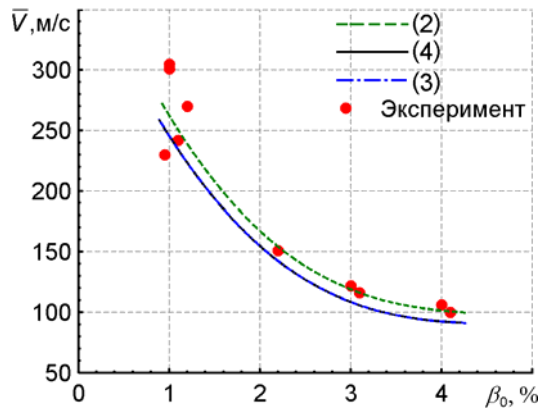


Рис. 5. Экспериментальные и теоретические значения скорости ударных волн в зависимости от объемной концентрации пузырьков. 1 – эксперимент ($W_0 = 1.6$ кДж), 2, 3, 4 – расчеты по (4), (2) и (3).

терные осциллограммы давления и свечения в волнах сжатия, распространяющихся при взрыве проволоочки в реагирующей пузырьковой среде, приведены на рис. 6. Здесь электроды расположены выше датчика D_{12} на 10.7 см, оптические вводы фотоумножителей расположены напротив пьезодатчиков.

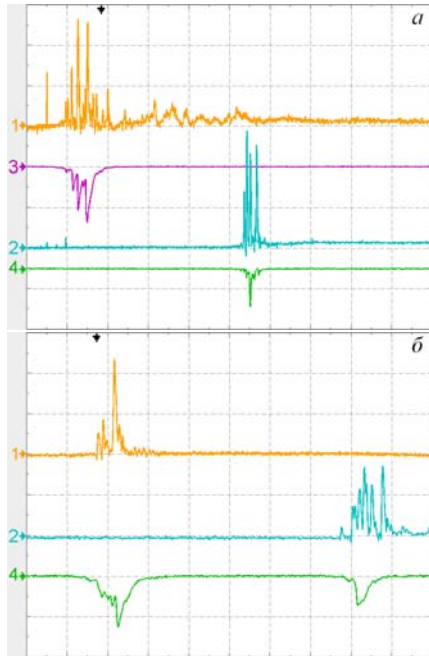


Рис. 6. Осциллограммы давления и свечения в секциях 1 (a) и 2 (б) при взрыве проволоочки в реагирующей пузырьковой среде, газовая смесь $C_2H_2 + 2,5O_2$, $\beta_0 = 4\%$, $U_{10} = 7.0$ кВ, по горизонтали: 100 (a), 50 (б) мкс/дел.

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.

при $W_0 = 1.6$ кДж и теоретических значений, вычисленных по процедуре (1), приведено на рис. 5.

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

Инициирование пузырьковой детонации взрывом проволоочки. Опыты проведены в диапазоне $\beta_0 = 1 \div 4\%$ с газовой смесью $C_2H_2 + 2,5O_2$ в постановке рис. 1, б. Харак-

терные осциллограммы давления и свечения в волнах сжатия, распространяющихся при взрыве проволоочки в реагирующей пузырьковой среде, приведены на рис. 6. Здесь электроды расположены выше датчика D_{12} на 10.7 см, оптические вводы фотоумножителей расположены напротив пьезодатчиков.

При подрыве проволоочки образуется пересжатая волна пузырьковой детонации длительностью 100-150 мкс с множественными пульсациями амплитудой 20-70 МПа и свечением пузырьков (рис. 6, а). По мере распространения в секции 1 она преобразуется в стационарную волну детонации – профиль давления становится ближе к коноидальному.

Волна пузырьковой детонации в дальнейшем не меняет профиль давления, скорость и является самоподдерживающейся (рис. 6, б). Начало отделения волны детонации от иницирующей волны происходит уже в секции 1 на длине < 0.3 м. Следующие за волной ПД короткие волны сжатия распространяются уже по прореагировавшей среде и быстро затухают.

Скорость детонационной волны не зависит от начального напряжения U_{10} . Из-за неоднородности среды при малой концентрации $\beta_0 = 1\%$ наблюдается разброс в измерениях скорости детонации как в верхней секции измерения, так и в нижней. Полученные данные находятся близко к измеренным значениям скоростей волны ПД в работах [1-4]. Инициирование короткой УВ от взрыва проволоочки подтверждает независимый от способа инициирования характер распространения волны пузырьковой детонации.

Модель пузырьковой детонации. В предложенной авторами модели [8] волна детонации формируется из пульсаций давления, возникающих в результате

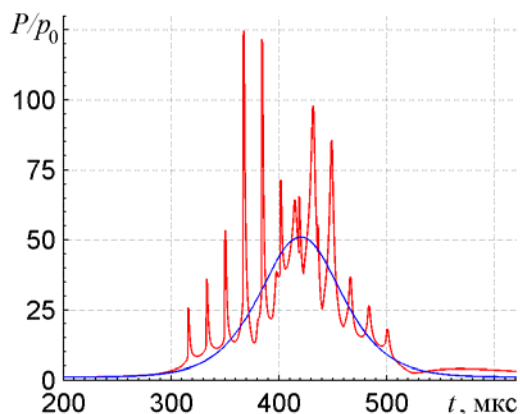


Рис. 7. Расчет структуры волны ПД в сжимаемой жидкости. Сплошная линия — усредненное поле давления.

ся ударная волна, сформированная из области сжатия за первой волной и имеющая нестационарный пульсационный профиль давления.

Обсуждаются проблемы измерения скорости нестационарных ударных волн в жидкости и пузырьковой инертной среде, предложен способ сравнения экспериментальных данных с теоретическими расчетами.

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 более 0.3 м.

Качественное и количественное совпадение расчетных и экспериментальных профилей давления в фиксированной точке наблюдения доказывает разумность предложенной модели.

Список литературы

- [1]. Сычев А.И., Пинаев А.В. Самоподдерживающаяся детонация в жидкостях с пузырьками взрывчатого газа // ПМТФ. 1986. №1. С. 133-138.
- [2]. 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.
- [3]. 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.
- [4]. 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.
- [5]. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. II // М.: Наука. 1987. 360 с.
- [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 // В сб. переводов. «Механика», 1968, №3, 109. С. 65-84.
- [8]. Пинаев А.В., Кочетков И.И. Расчет структуры волны пузырьковой детонации с учетом дискретного расположения пузырьков // ФГВ, 2008, т.44, №4, С. 116-126.

действия усредненного поля давления на дискретно расположенные слои пузырьков. При этом каждый пузырек совершает 2–3 колебания, создавая в жидкости пульсации давления, в несколько раз превышающие амплитуду усредненной волны (рис. 7). Модель с дискретным расположением пузырьков позволила получить соответствие расчетных и экспериментальных профилей давления волны пузырьковой детонации.

Выводы

Показано, что при взрыве проволоочки в жидкости в ближней зоне создается короткая УВ, которая быстро затухает. В дальней зоне регистрируется