

О ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДЕТОНАЦИИ ИЗ ПУЗЫРЬКОВОЙ СРЕДЫ ВО ВЗРЫВЧАТЫЙ ГАЗ

А.В. Пинаев

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

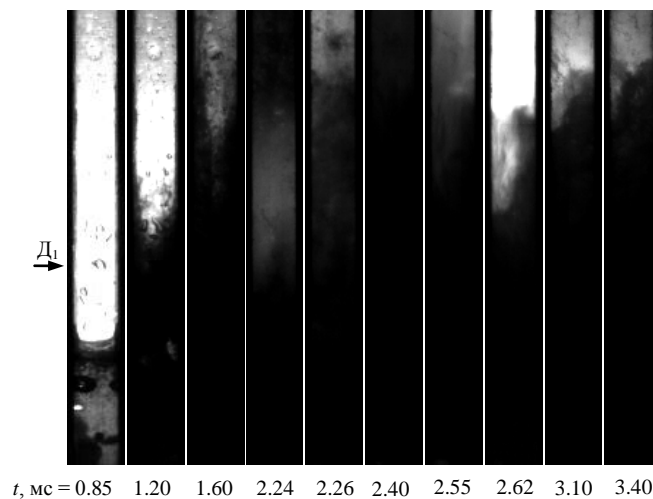
В [1-3] впервые предложен способ оптимального инициирования пузырьковой детонации (ПД) короткой ударной волной от взрыва проводника, расположенного внутри пузырьковой среды. Это позволило впервые поставить опыты по выяснению возможности и вероятности передачи детонации из пузырьковой среды в объем взрывчатого газа, который образуется над границей пузырьковой среды при получении необходимой объемной концентрации газовой фазы β_0 . Поскольку пузырьки в волне ПД воспламеняются не ближе 8-10 мм от верхней границы среды, а после прихода волны к границе газо-жидкостная среда становится разреженной, пенистой и движется вверх [4], то передача детонации из пузырьковой среды в газовый объем будет либо невозможна, либо существенно осложнена. Целью работы является выяснение всех промежуточных процессов, предшествующих инициированию газовой детонации, механизма передачи детонации из пузырьковой среды в газ и вероятности такого события.

В опытах конденсатор емкостью 1 мкФ заряжали до энергии $W_0 = 18 \div 40.5$ Дж, коэффициент передачи энергии в проволочку $\approx 2/3$, период собственных колебаний разрядного контура – 10.7 мкс. Проволочку из манганина диаметром 0.14 мм, длиной 9.5 \div 13.5 мм припаивали в нижней части медных электродов. Сопротивление проволочки и ее контактов (без электродов) составляло 0.26 \div 0.48 Ом, активное сопротивление электрической цепи между проволочкой и конденсатором – 0.11 Ом. В качестве жидкости использовали состав 75% H_2O + 25% глицерина, в качестве газа в пузырьках – смесь $\text{C}_2\text{H}_2 + 2.5\text{O}_2$. Размер пузырьков 3-4 мм, $\beta_0 = 1 \div 4\%$. По мере всплывания пузырьков взрывчатый газ вытеснял в атмосферу воздух и заполнял верхнюю часть установки, после чего проволочку взрывали.

Профили давления измеряли пьезодатчиками с собственной частотой 300 кГц, постоянная времени пьезодатчиков превышала 1 с, погрешность измерения давления – не более 5%. Интенсивность свечения регистрировали фотоумножителем (ФЭУ), два светодиода которого были установлены напротив пьезодатчика D_2 , находящегося в пузырьковой среде, и D_1 , расположенного над границей среды в газе. Для покадровой съемки использовали цифровую оптическую камеру Photron Fastcam, скорость съемки $f_c = (1 \div 5.25) \cdot 10^5$ кадр/с, время выдержки $\Delta t = 1 \div 1/f_c$ мкс. Подсветку осуществляли импульсной лампой ИФК-120 в течение 1.8 \div 2.2 мс.

Результаты экспериментов. Глубина погружения проволочки $L = 35, 20, 11, 4$ и 1 см. При всех L для $\beta_0 = 1, 2, 3$ и 4% определяли вероятность p передачи детонации из пузырьковой среды в объем газа, расположенный над границей пузырьковой среды (по 10 опытам на каждое значение β_0). Если $L \geq 4$ см, то детонация передается в газовый объем примерно в одном опыте из 10 ($p \approx 10.5 \pm 3.8\%$). При этом явной зависимости величины p от L и β_0 не прослеживается. Для $L \geq 4$ см время до воспламенения t_1 над границей пузырьковой среды, измеряемое после момента прихода волны ПД к этой границе, изменяется в пределах от 0.1 до 1.5 мс и не зависит от β_0 и L .

На рисунке приведены характерные кадры, отсчет времени t начинается от момента



Фотоснимки передачи пузырьковой детонации в объем газа, $\beta_0 = 3\%$, $L = 20$ см, $t_1 = 1.35$ мс, $f_c = 10^5$ с⁻¹, $\Delta t = 10$ мкс, $W_0 = 40.5$ Дж.

подачи тока на проволочку (слева стрелкой показано положение D_1). При $t = 0.85$ мс для волны ПД, движущейся снизу вверх, зарегистрировано воспламенение газовой смеси в сжатом пузырьке, расположенном примерно на расстоянии 1 см от поверхности среды, время свечения отдельного пузырька – 2-3 мкс. При дальнейшем движении волны ПД ($t > 0.85$ мс) к границе среды, пузырьки, находящиеся ближе 8-10 мм от нее, не воспламеняются, поскольку в них не достигается необходимая степень сжатия (3-4) из-за разгрузки волны давления. На двух следующих кадрах ($t = 1.25$ и 1.65 мс) зафиксировано перемещение границы с выбросом газожидкостной среды в газовое пространство – среда при движении вспенивается. В промежутке времени $1.65 < t < 2.24$ мс область наблюдения становится непрозрачной. При $t = 2.24$ мс ($t_1 = 1.35$ мс) в некотором объеме нагретой химически активной смеси происходит воспламенение, к этому моменту времени свечение импульсной лампы прекращается. Этот газовый объем находится в нижней части пенистой среды, выше D_1 . Затем ($t = 2.26$ мс) после перехода в детонацию детонационная волна движется вверх по пенистой среде со средней скоростью $V_1 \approx 1500$ м/с. После выхода детонации из пены свечение в ней исчезает ($t = 2.4$ мс). В дальнейшем, после инициирования детонации газовой смеси в верхней части трубы, наблюдается приход обратной взрывной волны, вызывающей сжатие газожидкостной среды.

Средняя скорость этой волны в газожидкостной среде $V_2 \approx 800$ м/с ($t \geq 2.55$ мс). Взрывная волна в объеме газа, распространяясь вверх и вниз, отражается от нижней более плотной газожидкостной среды и верхнего торца установки. Эти волны вызывают возвратно-поступательное движение пенистой среды со скоростью $V_3 \approx 80$ м/с. В опытах погрешности измерения скоростей V_1 и $V_2 \approx 15\%$, $V_3 \approx 25\%$. Датчик D_3 находится на расстоянии 45 мм от проволочки – ближе, чем D_2 , и регистрирует дополнительно ударную волну от взрыва проволочки. Средняя скорость ПД на участке между D_3 и D_2 $V_{23} \approx 400$ м/с. Датчик D_1 зарегистрировал последовательно: первичную волну нестационарной детонации в пенистой среде с амплитудой $P_{11} = 0.81$ МПа, затем обратную взрывную волну из газового объема (амплитуда $P_{12} = 1.06$ МПа, пик давления через 400 мкс от первой волны) и отраженную волну (пологий слабый пик давления через 1.27 мс после регистрации первого

фронта детонации). ФЭУ зафиксировал рассеянное свечение импульсной лампы примерно в течение 2 мс, свечение пузырьков в сечении D_2 и затем свечение длительностью 30 и 120 мкс напротив D_1 соответственно в волне детонации и взрывной обратной волне. Поскольку в обеих волнах напротив D_1 наблюдается сравнительно короткая продолжительность свечения и быстрый спад давления (особенно в первой волне), то это означает, что за их фронтом происходит охлаждение газообразных продуктов сгорания и подавление химических реакций в результате испарения жидкости.

Если вычислить задержку воспламенения τ смеси $C_2H_2+2.5O_2$, адиабатически сжимаемой газожидкостной средой в цилиндрической трубе, то при скоростях границы $50\div 100$ м/с соответственно получим $\tau \approx 6\div 12$ мс, что примерно на порядок больше регистрируемых величин t_1 . При таких значениях τ необходимо было бы обеспечить сжатие верхнего объема газовой смеси в 16-20 раз, что не наблюдается в эксперименте. Учитывая этот факт и полученные выше для $L \geq 20$ см результаты, можно **сформулировать механизм передачи детонации**: объем взрывчатого газа не инициируется продуктами сгорания газовой смеси в пузырьках непосредственно у границы пузырьковой смеси, первичный очаг воспламенения возникает внутри разреженной пенистой среды; цилиндрический верхний объем газовой смеси инициируется волной детонации, распространяющейся по пенистой среде, причем, гораздо раньше, чем при его адиабатическом сжатии газожидкостным поршнем из пенистой газожидкостной среды.

Этот механизм инициирования наблюдался во всех опытах при других значениях L . В последней серии опытов проволока была расположена на расстоянии $L = 1$ см от границы среды. Плазменный пузырь от взрывающейся проволоки при расширении выходит за границу пузырьковой среды, что способствует более успешному инициированию газовой детонации (по данным 10 опытов вероятность инициирования детонации в верхнем газовом объеме $p \approx 63.5\pm 4.5\%$). Выброс жидкости происходит быстрее и выше, чем при $L \geq 4$ см. Механизм воспламенения и все характерные стадии процесса остаются такими же, как и при $L \geq 4$ см. Из-за разгрузки плазменного пузыря вблизи границы среды большая часть его энергии уходит вверх. Здесь уже не волна ПД, а плазменный пузырь инициирует детонацию в пенистой среде, взрывная волна приходит на датчик D_1 сверху после детонации газового объема.

Впервые доказана возможность передачи детонации из пузырьковой среды во взрывчатую газовую смесь с вероятностью около 10%. Установлено, что первоначальное воспламенение происходит внутри слоя приграничной разреженной пенистой среды через $0.1\div 1.5$ мс после момента прихода волны ПД к границе пузырьковой среды. Объем газовой смеси инициируется волной детонации, распространяющейся по пенистой среде.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант №15-01-01154а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кочетков И.И., Пинаев А.В. Ударные и детонационные волны в жидкости и пузырьковых средах при взрыве проволоки // ФГВ. 2012. Т.48, №2. С. 124-133.
2. Пинаев А.В., Кочетков И.И. Критическая энергия инициирования волны пузырьковой детонации при взрыве проволоки // ФГВ. 2012. Т.48, №3. С. 133-139.
3. Kochetkov I.I., Pinaev A.V. Comparative characteristics of strong shock and detonation waves in bubble media by an electrical wire explosion // Shock Waves. 2013. V.23, №2. P. 139-152. Doi:10.1007/s00193-012-0422-7.
4. Кочетков И.И., Пинаев А.В. Результаты исследования взрыва проволоки в химически инертных и активных пузырьковых средах // XII Международная конференция Забавхинские научные чтения 2-6 июня 2014. – РФЯЦ – ВНИИТФ, Снежинск. Труды ЗНЧ-2014. С. 1-7. <http://www.vniitf.ru/>.