

ЭВОЛЮЦИЯ СФЕРИЧЕСКИХ УДАРНЫХ И ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В СВОБОДНОМ СТОЛБЕ ПУЗЫРЬКОВОЙ СРЕДЫ ПРИ ВЗРЫВЕ ПРОВОЛОЧКИ

А.В. Пинаев¹, В.А. Пинаев²

¹*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
630090, Новосибирск, Россия*

²*Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Новосибирск, Россия*

Исследована динамика сферических ударных и детонационных волн в химически инертных и активных пузырьковых средах при точечном взрыве, определены критические энергии инициирования W^* сферической пузырьковой детонации. Изучен механизм возбуждения и особенности формирования сферических волн пузырьковой детонации, создаваемых электрическим разрядом внутри реагирующих пузырьковых сред.

Экспериментальная установка – заполненная водой (20-23 °С) металлическая труба с внутренним диаметром 613 мм, толщиной стенки 7 мм и высотой 1.49 м. На дне трубы располагался генератор пузырьков диаметром 220 мм. Пузырьки газа в свободном пузырьковом столбе размером 3-4 мм и объемной концентрацией $b_0 = 1 \div 4\%$ создавали с помощью 250-ти игл (внутренний диаметр 0.5 мм), расположенных равномерно по поверхности генератора пузырьков. В качестве газов использовали смесь $C_2H_2 + 2.5O_2$ или воздух. Для получения свободного столба пузырьков была изготовлена телескопическая труба, состоящая из трёх цилиндрических стальных тонкостенных секций (толщина стенки 1.5 мм) длиной по 0.5 м с внутренними диаметрами 225, 232 и 240 мм. В зазорах между трубами были размещены захваты, которые обеспечивали автоматическое сцепление секций между собой при их подъёме вверх. Телескопическую трубу крепили на специальном спусковом устройстве и затем заполняли пузырьками. После срабатывания спускового устройства происходило свободное падение секций в течение 0.5 с и автоматическое разъединение захватов. За время падения секций геометрия свободного столба пузырьков практически не изменялась. В момент удара верхней секции с максимальным диаметром о дно установки осуществлялся взрыв проволоочки для инициирования пузырьковой детонации.

В верхней секции телескопической трубы вдоль её оси размещали медные изолированные электроды диаметром 3 мм. В нижней части электродов припаивали манганиновые проволоочки диаметром 0.14 мм и длиной менее 10 мм. Сопротивление проволоочек составляло 0.3÷0.5 Ом, активное сопротивление электрической цепи между проволоочкой и конденсатором 0.11 Ом. Конденсаторы емкостью $C_0 = 1, 2$ и 50 μF заряжали до запасённой электрической энергии $W_0 = 8 \div 1600$ J, коэффициент передачи энергии в проволоочку и разрядный плазменный пузырь $K \approx 2/3$. Размер начальной области взрыва (10 мм), здесь меньше либо порядка расстояния l между пузырьками (при $d_0 = 4$ мм и $b_0 = 1 \div 4\%$ $l = 17 \div 10$ мм соответственно). В исследуемой среде взрыв короткого проводника можно считать точечным даже на малых расстояниях, сравнимых с масштабом неоднородности среды – межпузырьковым расстоянием. Интенсивность свечения регистрировали фотоумножителем (ФЭУ), световоды которого были установлены вблизи пьезоэлементов вдоль пьезодатчиков, время разрешения фотоумножителя – 0.5 μs .

На осциллограммах разрядного тока, напряжения и свечения при взрыве проводника в течение 2.5-4.0 μs после замыкания цепи регистрируется резкий рост, затем падение тока после разрушения взрывающейся проволоочки, длительность первой яркой вспышки проволоочки 6.5-13.5 μs . Если $W_0 > 18 \text{ J}$, то после первого пика свечения наблюдается повторное свечение плазменного пузыря. Повторное свечение возникает при пробое разрядного промежутка, продолжительность свечения в несколько раз превышает время выделения энергии.

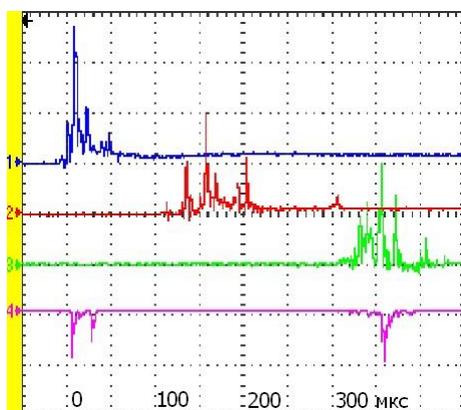
Давление измеряли стержневыми пьезокерамическими датчиками с диаметром пьезоэлемента 2 мм. Пьезодатчики размещали либо снаружи цилиндров (в воде), либо внутри них – в пузырьковой среде. Сигналы с пьезодатчиков подавали на истоковый повторитель. Постоянная времени пьезодатчиков превышала 1 с, погрешность измерения давления менее 5%.

При значениях переданной в проволоочку и плазменный пузырь энергии конденсатора $W_1 = 2/3 W_0 > 10 \div 13 \text{ J}$ происходило формирование плазменного разрядного пузыря и ударной волны. Ударная волна в пузырьковой среде образуется в результате поршневого воздействия плазменного пузыря, формирующегося при разряде конденсатора. Энергии испарения и энергии плавления используемых в работе проволоочек равны соответственно $W_2 = 6.50 \div 9.21 \text{ J}$ и $W_3 = 0.68 \div 0.97 \text{ J}$. Если $W_2 < W_1 < 10 \text{ J}$, то формируется короткая быстро затухающая с расстоянием ударная волна от взрывающейся проволоочки, разрядный плазменный пузырь либо слабо развит, либо не образуется. Энергии слабой ударной волны недостаточно для возбуждения пузырьковой детонации.

В области $W_3 < W_1 < W_2$ энергии хватает лишь для расплавления проводника, но недостаточно для образования плазменного пузыря и ударной волны. Ни в одном из опытов не происходило воспламенение пузырьков и инициирование пузырьковой детонации путём контакта продуктов расплавленной проволоочки на пузырьки (без образования ударной волны).

Формирование волны пузырьковой детонации начинается на коротком расстоянии от проволоочки благодаря обнаруженной нами возможности возбуждения пузырьковой детонации короткими сильными ударными волнами от взрыва проволоочки (см. рис.). Такой способ инициирования пузырьковой детонации можно считать удачной находкой, позволяющей выполнить, в том числе, и настоящее исследование. Осциллограммы профилей давления, полученные вблизи и на удалении от проволоочки, доказывают наличие резонансного ударно-волнового механизма инициирования пузырьковой детонации.

При взрыве проволоочки с энергией $W_0 \geq 15 \div 20 \text{ J}$, в пузырьковой среде под воздействием ударной волны возникает самоподдерживающийся детонационный процесс. На начальной стадии взрыва проволоочки плазменный пузырь повторяет форму проволоочки и имеет форму короткого цилиндра, затем по мере его расширения форма пузыря становится близкой к сферической. Величина скорости пузырьковой детонации определяется здесь в основном таким параметром газожидкостной среды, как b_0 и не зависит от величины энергии инициирования. Пузырьковая детонация представляет собой волну солитонного типа с пульсациями давления. Профиль её давления подобен профилю давления пузырьковой детонации в ударной трубе. При $b_0 = 1 \div 2\%$ скорость волны пузырьковой детонации $D = 930 \div 750 \text{ m/s}$ в 8-9 раз выше равновесной скорости звука в пузырьковой среде, но меньше скорости звука в жидкости $c_f = 1483 \div 1492 \text{ m/s}$ (при $20 \div 23 \text{ }^\circ\text{C}$).



Осциллограмма профилей давления (1-3) и свечения (4) при инициировании самоподдерживающейся пузырьковой детонации. Световоды ФЭУ расположены напротив пьезодатчиков 1 и 3, проводочка находится выше датчика 1 на 170 мм. По вертикали: 1-3 – 14.7, 15.4, 13.4 МПа/cases соответственно, 4 – 5 V/cases; $C_0 = 2 \mu\text{F}$, $W_0 = 64 \text{ J}$, жидкость – вода, пузырьки $\text{C}_2\text{H}_2 + 2.5\text{O}_2$, $b_0 = 3,1\%$, $D_{13} = 530 \text{ m/s}$.

При сжатии пузырька с ростом вязкости жидкости согласно уравнению Рэлея увеличиваются потери энергии, уменьшаются конечные давление и температура в пузырьках. Но в экспериментах [1,2] наблюдается прямо противоположное, что объясняется вязкостной стабилизацией поверхности пузырьков и уменьшением поступления жидкой фазы внутрь пузырьков. Этот результат имеет важное прикладное значение для химически активных и инертных пузырьковых сред. Путём численных расчётов выяснено влияние количества попавшей внутрь пузырька жидкости на параметры газа при сжатии пузырька [3,4]. Для получения необходимых для расчёта параметров в волне пузырьковой детонации экспериментально исследовался процесс сжатия отдельных пузырьков с реагирующим газом $\text{C}_2\text{H}_2 + 2.5\text{O}_2$ при стандартных начальных условиях. Из полученных осциллограмм профилей давления, свечения и зависимостей d/d_0 от времени следует, что d_{min}/d_0 обычно расположено вблизи начала воспламенения. В волне пузырьковой детонации $d_0/d_{\text{min}} \approx 3-4$, время от начала взаимодействия с пузырьком до его воспламенения составляет 20–30 мкс. Длительность пульсаций давления 4–6 мкс соответствует узкому пику в окрестности точки воспламенения пузырьков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пинаев А.В., Сычев А.И. Структура и свойства детонации в системах жидкость-пузырьки газа // ФГВ. 1986. Т. 22, № 3. С. 109-118.
2. 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 // ФГВ. 1987. Т. 23, № 6. С. 76-84.
3. Пинаев А.В., Прохоров Е.С. Параметры продуктов взрыва газа при пузырьковой детонации // Сборник тезисов докладов Всероссийской школы-конференции с международным участием «Химия и физика горения и дисперсных систем», посвященной 110-летию со дня рождения члена-корреспондента АН СССР А.А. Ковальского. Новосибирск, ИХКГ СО РАН, 19-20 сентября 2016 г. С. 49-50.
4. Pinaev A.V., Prokhorov E.S. Parameters of gas explosion products in bubble detonation // Труды Всероссийской школы-конференции с международным участием «Химия и физика горения и дисперсных систем», посвященной 110-летию со дня рождения члена-корреспондента АН СССР А.А. Ковальского. Новосибирск, ИХКГ СО РАН, 19-20 сентября 2016 г., 1-5 стр., http://www.kinetics.nsc.ru/kovalsky_110/Papers/Kov_110_proc12.pdf