

УДК 534.222.2+532.529

# ИНИЦИИРОВАНИЕ ОБЪЕМА ГАЗА НАД ГРАНИЦЕЙ ГАЗОЖИДКОСТНОЙ СРЕДЫ ВОЛНОЙ ПУЗЫРЬКОВОЙ ДЕТОНАЦИИ

А. В. Пинаев, И. И. Кочетков

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

Установлена возможность передачи детонации из пузырьковой реагирующей среды в объем взрывчатого газа, находящийся над поверхностью раздела. Опыты выполнены в постановке, когда пузырьковую детонацию возбуждали взрывом проводника в газожидкостной среде. Исследована динамика границы газожидкостной среды после прихода к ней волны пузырьковой детонации. Расстояние между провололочкой и границей пузырьковой среды уменьшали вплоть до 1 см, когда происходило инициирование объема газа горячими продуктами от взрыва проводника и разрядной плазмой. Определена вероятность передачи детонации из пузырьковой среды в объем газовой смеси в зависимости от глубины погружения проволоочки, и описаны механизмы воспламенения объема взрывчатого газа.

Ключевые слова: взрыв проволоочки, плазменный разрядный пузырь, ударная волна, пузырьковая детонация, воспламенение пенистой среды, инициирование газовой смеси.

DOI 10.15372/FGV20160111

## ВВЕДЕНИЕ

В [1–3] пузырьковую детонацию (ПД) инициировали не традиционным способом — плоской волной газовой детонации или ударной волной, падающей сверху на границу газожидкостной среды, а в новой постановке — короткой ударной волной от взрыва небольшого проводника, расположенного внутри пузырьковой среды. Установлено, что при таком способе инициирования существенно сокращается время формирования пузырьковой детонации. В [2, 3] показано, что при малых околосредних энергиях конденсатора  $W_0 = 12 \div 64$  Дж стационарная волна ПД формируется быстрее, чем при большой энергии  $W_0 = 0.3 \div 1$  кДж. В данной работе пузырьковую детонацию инициировали взрывом проволоочки при малых значениях  $W_0 = 18 \div 40.5$  Дж.

При подготовке опыта над пузырьковой средой поддерживается постоянное атмосферное давление, для установления границы среды на фиксированном уровне (с целью достижения необходимой объемной концентрации газовой фазы  $\beta_0$ ) требуется несколько минут. В

течение этого времени газ из верхнего участка трубы непрерывно отводится по трубке в атмосферу и постепенно замещается взрывчатой газовой смесью практически до того же состава, что и в пузырьках. В [4] установлено, что пузырьки воспламеняются не ближе  $8 \div 10$  мм от границы и горячие продукты сгорания в пузырьках изолированы приповерхностным слоем жидкости от газового объема. После прихода волны ПД к границе раздела газожидкостная среда становится разреженной (пенистой) и движется вверх. При анализе выхода волны ПД на границу среды возникают следующие задачи. Существует ли какая-либо вероятность непосредственного попадания горячих продуктов сгорания газовой смеси из пузырьков в объем газа, расположенный над границей пузырьковой среды, и инициирования в нем химических реакций? Могут ли образоваться очаги воспламенения в микрообъемах несгоревшей газовой смеси, находящихся внутри движущейся пенистой среды? Способен ли самовоспламениться в верхнем участке трубы газ, сжимаемый пенистой средой?

Цель настоящей работы — выяснить возможность и механизмы передачи пузырьковой детонации в объем взрывчатого газа, находящийся над границей раздела, а также возможность воспламенения этого газа с помощью

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-01-01154а).

взрывающегося проводника, расположенного в пузырьковой среде в непосредственной близости от ее границы.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Опыты проводили в вертикальной ударной трубе внутреннего диаметра 35 мм и длиной 4.5 м (рис. 1). Трубу заполняли водой или жидкостью  $0.75\text{H}_2\text{O} + 0.25$  глицерина. Снизу трубы расположены трубочки, создающие пузырьки смеси  $\text{C}_2\text{H}_2 + 2.5\text{O}_2$  размером  $d_0 = 3 \div 4$  мм и объемной концентрацией  $\beta_0 = 1 \div 4$  %. К нижним концам медных электродов диаметром 3 мм, покрытых изоляцией, припаивали оловом манганиновые проволоочки. Диаметр проволоочек 0.14 мм, длина  $l = 9.5 \div 13.5$  мм, их сопротивление с двумя контактами  $0.26 \div 0.48$  Ом соответственно. Активное сопротивление электрической цепи между проволочкой и конденсатором 0.11 Ом. Расстояние  $L$  от проволоочки до поверхности пузырьковой среды изменяли от 35 до 1 см.

В течение примерно 5 мин по мере всплытия пузырьков взрывчатый газ вытеснял через выходной патрубков воздух и заполнял все пространство над пузырьковой средой, после чего осуществляли взрыв проволоочки.

Напряжение  $U_0 = 6 \div 9$  кВ на конденсаторе емкостью  $C_0 = 1$  мкФ, коэффициент передачи энергии в проволочку  $\approx 2/3$ , разрядный ток измеряли на шунте сопротивлением 7.06 мОм. Период собственных колебаний

разрядного контура 10.7 мкс. Осциллограммы напряжения, разрядного тока и свечения при взрыве проволоочки в пузырьковой среде приведены в [1–4].

Профили давления измеряли пьезокерамическими датчиками с собственной частотой  $f_s = 300$  кГц, постоянная времени пьезодатчиков превышала 1 с, погрешность измерения давления — не более 5 %. Интенсивность свечения регистрировали фотоумножителем (ФЭУ) с помощью двух световодов: напротив пьезодатчика  $D_2$ , находящегося в пузырьковой среде, и пьезодатчика  $D_1$ , расположенного над границей среды в газе. Время разрешения фотоумножителя, определяемое выходной электрической цепью, — 0.5 мкс. Электрические сигналы записывали двумя осциллографами Tektronix TDS2014.

Покадровую съемку проводили с помощью цифровой оптической камеры Photron Fastcam, размещенной напротив измерительной секции с двумя продольными щелями размером  $8 \times 240$  мм. Скорость съемки составляла  $f_c = (1 \div 5.25) \cdot 10^5$  кадр/с, время выдержки  $\Delta t$  задавалось в интервале от 1 мкс до  $1/f_c$ . Подсветку осуществляли импульсной лампой ИФК-120 с противоположной от камеры продольной щели, максимальное время подсветки  $1.8 \div 2.2$  мс.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Первая серия опытов была проведена при  $L = 35$  см. На такой глубине погружения проволоочки параметры волны ПД к моменту ее выхода на поверхность пузырьковой среды близки к стационарным [1, 3]. Затем  $L$  последовательно уменьшали до 20, 11, 4 и 1 см. На каждом расстоянии  $L$  от границы среды при  $\beta_0 = 1, 2, 3$  и 4 % определяли вероятность  $P$  передачи детонации (по 40 опытам на все значения  $\beta_0$ ) из пузырьковой среды в объем газа, расположенный над границей пузырьковой среды. Оказалось, что если  $L \geq 4$  см, то детонация передается в газовый объем примерно в одном опыте из десяти ( $P \approx 10.5 \pm 3.8$  %). При этом явной зависимости величины  $P$  от  $L$ ,  $\beta_0$  и  $W_0$  не прослеживается. Время задержки воспламенения  $t_1$  над границей пузырьковой среды, измеряемое после момента прихода волны ПД к этой границе, изменяется в пределах  $0.1 \div 1.5$  мс и не зависит от  $\beta_0$ ,  $W_0$  и  $L$  (для  $L \geq 4$  см). Приведенные результаты с учетом выяснения влияния величины  $W_0$  получены на основе примерно 500 опытов.

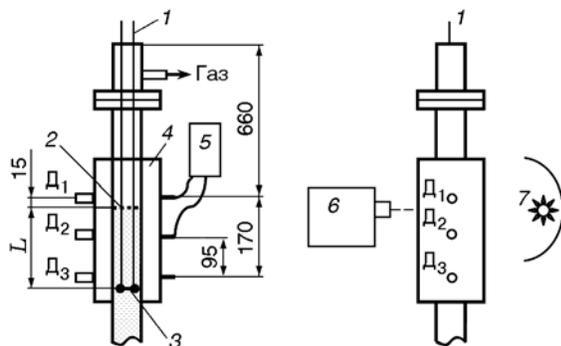


Рис. 1. Принципиальная схема верхней части вертикальной ударной трубы:

1 — электроды, 2 — уровень пузырьковой среды, 3 — проволочка, 4 — секция измерений, 5 — ФЭУ, 6 — оптическая камера, 7 — импульсная световая лампа,  $D_1 \div D_3$  — пьезодатчики

На рис. 2, *a* для  $L = 20$  см приведены некоторые наиболее контрастные кадры поведения пузырьков, образования и движения пенистой среды, а также воспламенения в объеме пенистой среды. Отсчет времени  $t$  здесь и на последующих фотоснимках и осциллограммах начинается от момента подачи тока на проволочку.

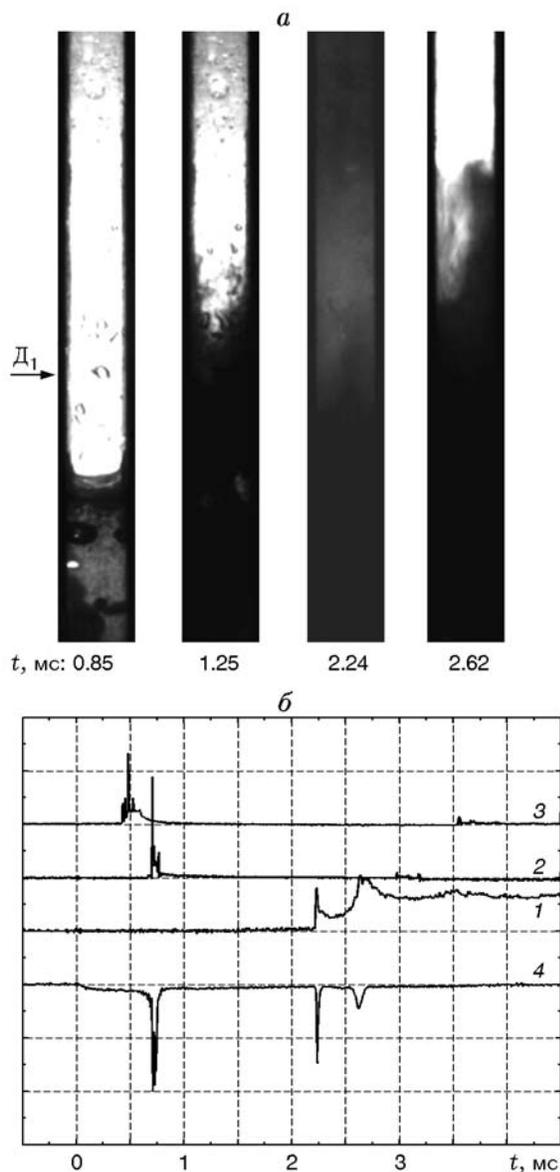


Рис. 2. Фотоснимки передачи пузырьковой детонации в объем газа (*a*) и соответствующая осциллограмма (*b*) профилей давления (1–3) и свечения (4) при  $\beta_0 = 3\%$ ,  $C_0 = 1$  мкФ,  $W_0 = 40.5$  Дж,  $L = 20$  см,  $f_c = 10^5$  с $^{-1}$ ,  $\Delta t = 10$  мкс,  $t_1 = 1.35$  мс:

по вертикали: 1 — 1 МПа/дел, 2 — 4 МПа/дел, 3 — 10 МПа/дел, 4 — 2 В/дел

На всех рисунках стрелкой слева показано положение датчика  $D_1$ . На кадре в момент времени  $t = 0.85$  мс, когда волна пузырьковой детонации в области съемки движется снизу вверх, зарегистрировано воспламенение газовой смеси в сжатом пузырьке, расположенном примерно на расстоянии 1 см от поверхности среды. На этом же кадре лежащие ниже пузырьки, которые воспламенились раньше, расширяются и разрушаются. Свечение отдельного пузырька длится около  $2 \div 3$  мкс. При дальнейшем продвижении волны ( $t > 0.85$  мс) к границе среды, пузырьки, находящиеся от нее на расстоянии ближе  $8 \div 10$  мм, не воспламеняются, поскольку в них не достигается необходимая степень сжатия ( $n = 3 \div 4$ ) из-за разгрузки волны давления (эти кадры не приведены, более подробная информация содержится в [4]).

На кадре  $t = 1.25$  мс (см. рис. 2, *a*) граница газожидкостной среды переместилась вверх. Впоследствии происходит выброс газожидкостной среды в газовое пространство, и среда при движении вспенивается. Из-за неровности границы, обусловленной наличием пузырьков и неоднородностью поля давления в волне, выброс жидкой фазы происходит неравномерно по сечению трубы. В промежуток времени  $1.65 < t < 2.24$  мс газожидкостная среда перекрывает всю верхнюю область подсветки и она становится непрозрачной. При  $t = 2.24$  мс ( $t_1 = 1.35$  мс) в объеме химически активной смеси, расположенном в нижней части пенистой среды, происходит воспламенение (к этому моменту времени свечение импульсной лампы полностью прекращается). Центр слабо светящейся воспламенившейся области пенистой среды расположен примерно на 1.2 см выше датчика  $D_1$ . Затем после перехода в детонацию ( $2.26 \leq t \leq 2.4$  мс) детонационная волна движется вверх по пенистой среде со средней скоростью  $v_1 \approx 1500$  м/с. После выхода детонации из пенистой среды, расположенной в области кадра, свечение исчезает ( $t \geq 2.4$  мс). Затем происходит инициирование детонации объема газовой смеси в верхней части трубы, и начиная с момента времени  $t = 2.55$  мс наблюдается приход светящейся взрывной волны, вызывающей сжатие газожидкостной среды (см. кадр  $t = 2.62$  мс). 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 по трубе, отражается от нижней, более плотной газожидкост-

ной среды и верхнего торца трубы. Эти волны при  $t > 2.55$  мс вызывают возвратно-поступательное движение пенистой среды со скоростью  $v_3 \approx 80$  м/с. В этом и последующих опытах погрешность измерения скоростей  $v_1$  и  $v_2$  около 15 %,  $v_3$  — около 25 %. Значения средних скоростей волн  $v_1 \div v_3$  определялись по измерениям смещения осредненного фронта светящейся области между соседними кадрами. Погрешность измерения скорости волны зависела в основном от ошибки определения положения фронта волны на кадре.

Осциллограмма на рис. 2,б соответствует опыту на рис. 2,а. Здесь и далее сигналы 1–3 — это профили давления на датчиках  $D_1 \div D_3$ , сигналы 4 — интенсивность свечения, фиксируемая ФЭУ с помощью двух световодов, расположенных напротив  $D_2$  и  $D_1$  (см. рис. 1). На осциллограмме волна детонации проходит вверх мимо датчиков  $D_3$ ,  $D_2$  и  $D_1$ . Амплитуда сигнала на датчике  $D_3$  ( $p_3 = 13.35$  МПа) выше, чем на  $D_2$  ( $p_2 = 7.58$  МПа). Датчик  $D_3$  находится на расстоянии 45 мм от проволоочки — ближе, чем  $D_2$ , и регистрирует дополнительно ударную волну от взрыва проволоочки. Средняя скорость волны ПД на участке между  $D_3$  и  $D_2$   $v_{23} \approx 400$  м/с, погрешность ее измерения около 10 %. Датчик  $D_1$ , расположенный выше поверхности пузырьковой среды на 15 мм, зарегистрировал (сигнал 1) 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 первого фронта детонации).

ФЭУ зафиксировал (сигнал 4) рассеянное свечение импульсной лампы (слабый пологий сигнал при  $0 < t \leq 1.8$  мс), яркое свечение воспламенившихся пузырьков в сечении датчика  $D_2$  и затем свечение длительностью 30 и 120 мкс напротив  $D_1$  соответственно в волне детонации и взрывной обратной волне. Поскольку в обеих волнах напротив  $D_1$  наблюдаются сравнительно короткая продолжительность свечения и быстрый спад давления (особенно в первой волне), это означает, что за фронтом этих волн происходят охлаждение газообразных продуктов сгорания и подавление химических реакций в результате испарения жидкой фазы в пенистой среде.

Расчет задержки воспламенения  $\tau$  газовой смеси  $C_2H_2 + 2.5O_2$ , адиабатически сжимаемой газожидкостной средой в цилиндрической трубе, при регистрируемых скоростях границы  $50 \div 100$  м/с дает значения  $\tau \approx 6 \div 12$  мс — это примерно на порядок больше величин  $t_1$ . При этом необходимо было бы обеспечить сжатие газовой смеси в  $16 \div 20$  раз, чего не наблюдается в эксперименте. Учитывая этот факт и полученные выше для  $L \geq 20$  см результаты, можно сделать предварительные выводы:

а) объем взрывчатого газа не инициируется продуктами сгорания газовой смеси в пузырьках непосредственно у границы пузырьковой смеси;

б) первоначальное воспламенение происходит внутри разреженной пенистой среды;

в) цилиндрический объем газовой смеси воспламеняется гораздо раньше, чем это должно произойти в процессе его адиабатического сжатия с помощью движущейся вверх газожидкостной среды;

г) газовая смесь в верхнем объеме трубы инициируется волной детонации, распространяющейся по пенистой среде.

Правильность этих выводов подтвердили опыты, проведенные при  $L = 11$  см, когда проволочка располагалась на 5 см ниже датчика  $D_2$ . Воспламенение в опыте на рис. 3 начинается при  $t = 1.78$  мс примерно в той же области пенистой среды, что и на рис. 2,а. На кадре  $t = 1.79$  мс видно, что в пенистой среде распространяется детонация, свечение в среде усиливается. Здесь время воспламенения  $t_1 = 1.5$  мс,  $v_1 \approx 2000$  м/с. После детонации расположенного выше газового объема взрывная, ярко светящаяся волна из него приходит в верхнюю наблюдаемую часть пенистой среды со скоростью  $v_2 \approx 1050$  м/с при  $t \geq 2.05$  мс. Кадры при  $t = 2.14$  и  $2.22$  мс иллюстрируют процесс сжатия пенистой среды взрывной волной.

На рис. 4,а приведен пример наиболее быстрой передачи детонации из пузырьковой среды в объем газа при  $L = 4$  см. Здесь в нижней области наблюдения виден светящийся плазменный пузырь от взрыва проволоочки, ФЭУ регистрирует свечение плазмы в течение  $0 < t < 0.5$  мс (сигнал 4 на рис. 4,б). Нестационарная волна пузырьковой детонации выходит к поверхности пузырьковой среды при  $t = 450$  мкс, после чего часть жидкости выбрасывается в газовое пространство. При  $0.9 \leq t < 1.19$  мс импульсная лампа уже не просвечивает

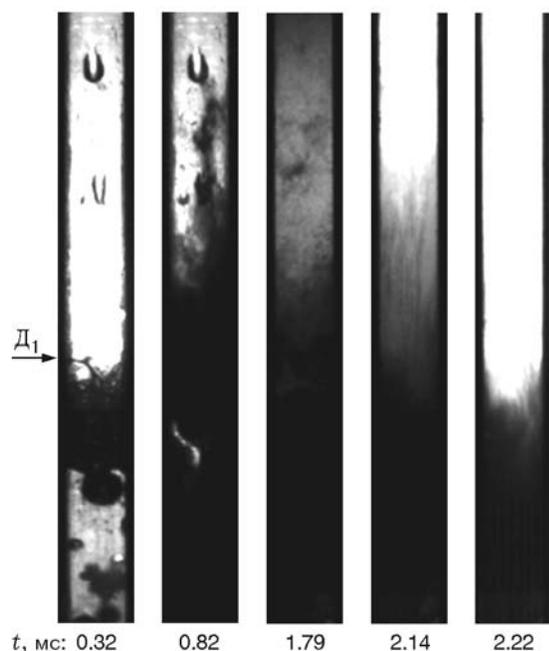


Рис. 3. Фотоснимки передачи пузырьковой детонации в объем газа при  $\beta_0 = 4\%$ ,  $C_0 = 1$  мкФ,  $W_0 = 40.5$  Дж,  $L = 11$  см,  $f_c = 10^5$  с $^{-1}$ ,  $\Delta t = 10$  мкс,  $t_1 = 1.5$  мс

ет область наблюдения. В момент  $t = 1190$  мкс в пенистой среде наблюдается воспламенение ( $t_1 = 98$  мкс), переходящее в детонацию горючей смеси в разреженной пенистой среде, чему соответствуют на осциллограмме рис. 4, б первый скачок давления (сигнал 1) и соответствующий короткий сигнал свечения (сигнал 4). Затем детонационный процесс развивается в обе стороны по газожидкостной среде: волна, движущаяся вниз, сжимает пенистую среду, а движущаяся вверх волна инициирует детонацию в объеме газа. На кадре  $t = 1630$  мкс приведена взрывная, ярко светящаяся волна, распространяющаяся сверху вниз, после детонации верхнего объема газа.

Проволочка в этом опыте расположена на 20 мм выше  $D_2$ , волна ПД распространяется вниз со скоростью  $v_{23} \approx 780$  м/с,  $p_2 = 7.19$  МПа,  $p_3 = 6.09$  МПа (рис. 4, б). При  $t = 1.63$  мс датчик  $D_1$  регистрирует взрывную волну, приходящую из объема газовой смеси в нижнюю границу расширяющейся области, а при  $t = 2.39$  мс — отраженную от верхнего торца трубы волну давления с амплитудами  $p_{11} = 1.66$  МПа и  $p_{12} = 1.16$  МПа. На соответствующих снимках (см. рис. 4, а) в эти моменты вре-

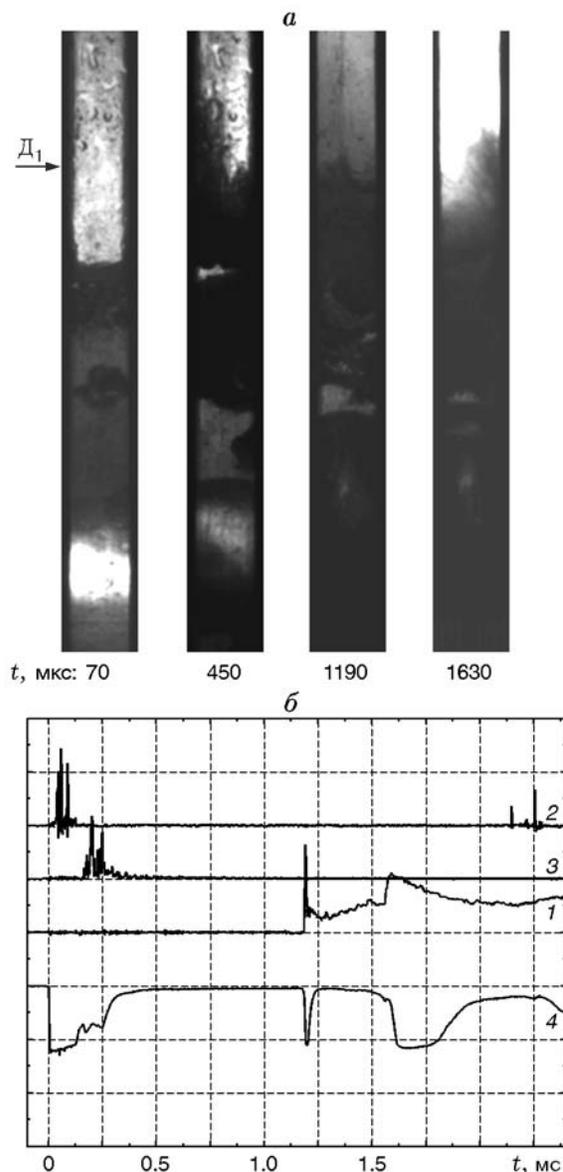


Рис. 4. Фотоснимки передачи пузырьковой детонации в объем газа (а) и соответствующая осциллограмма (б) профилей давления (1–3) и свечения (4) при  $\beta_0 = 1\%$ ,  $C_0 = 1$  мкФ,  $W_0 = 40.5$  Дж,  $L = 4$  см,  $f_c = 10^5$  с $^{-1}$ ,  $\Delta t = 10$  мкс,  $t_1 = 98$  мкс:

по вертикали: 1 — 1 МПа/дел, 2, 3 — 5 МПа/дел, 4 — 5 В/дел

мени фиксируется свечение.

В последней серии опытов проволочка была расположена на расстоянии  $L = 1$  см от границы среды (на 50 мм выше датчика  $D_2$ ). В этом случае плазменный пузырь при расширении может выходить за границу пузырьковой среды, что способствует более успешной пере-

даче детонации из-за возможности воспламенения газовой смеси горячими продуктами взорвавшейся проволоочки и разогретой плазмы. При  $L = 1$  см вероятность передачи детонации из пузырьковой среды в газ  $P \approx 63.5 \pm 4.5 \%$ .

На рис. 5,а приведены характерные снимки передачи детонации в газовый объем ( $L = 1$  см). За счет близкого расположения проволоочки к границе среды заброс пузырьковой жидкости в газ происходит быстрее и выше, чем при больших значениях  $L$ . По этой причине граница пузырьковой среды после прихода взрывной волны из газового объема смещается ниже начального уровня (см.  $t = 10$  и 950 мкс). При  $t = 490$  мкс пенистая среда перекрывает всю область кадра. В этом опыте время воспламенения  $t_1 \approx 0.5$  мс, механизм воспламенения и все характерные стадии процесса такие же, как и в предыдущих опытах (при  $L \geq 4$  см). На кадре  $t = 510$  мкс наблюдается развитая детонация в пенистой среде, распространяющаяся вверх по трубе со скоростью  $v_1 \approx 2000$  м/с. На кадрах  $t \geq 860$  мкс зафиксирована ярко светящаяся взрывная волна, пришедшая из газового объема. Видно возвратно-поступательное движение взрывной волны в процессе ее отражения от верхнего торца трубы и границы газожидкостной среды.

На соответствующей осциллограмме (рис. 5,б) зарегистрирован взрыв проволоочки и инициирование пузырьковой детонации: волна проходит от проволоочки вниз мимо  $D_2$  (сигнал 2, первая волна,  $p_2 = 3.14$  МПа, см. также сигнал 4, первый пик свечения) и затем мимо  $D_3$  (сигнал 3,  $p_3 = 3.57$  МПа). Средняя скорость волны  $v_{23} \approx 480$  м/с. Из-за разгрузки плазменного пузыря вблизи свободной поверхности большая часть его энергии уходит вверх, поэтому инициирование ПД оказывается околоскритическим, а амплитуда давления в волне пузырьковой детонации сравнительно низкой. Плазменный пузырь здесь инициирует детонацию в пенистой среде (сигнал 1,  $p_{11} = 0.74$  МПа,  $t = 0.5$  мс). Взрывная волна приходит на датчик  $D_1$  сверху после детонации газового объема (сигнал 1,  $p_{12} = 1.48$  МПа,  $t = 0.87$  мс). Эта волна затем распространяется без реакции по пузырьковой среде, ее регистрирует датчик  $D_2$  (сигнал 2, вторая волна), на датчике  $D_3$  волна затухает. Датчик  $D_1$  регистрирует также третью ударную волну (сигнал 1,  $t = 1.508$  мс) с максимумом свечения при  $t \approx 1.51$  мс, а затем четвертую волну

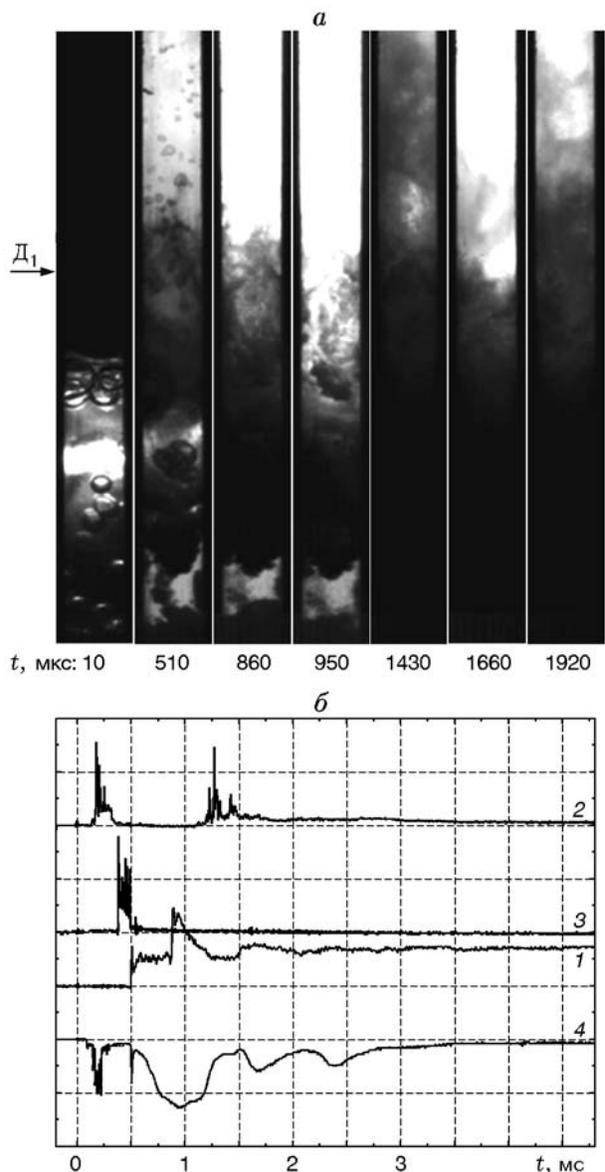


Рис. 5. Фотоснимки передачи детонации в объем газа при взрыве проволоочки (а) и соответствующая осциллограмма (б) профилей давления (1–3) и свечения (4) при  $\beta_0 = 4 \%$ ,  $C_0 = 1$  мкФ,  $W_0 = 18$  Дж,  $L = 1$  см,  $t_1 = 0.5$  мс,  $f_c = 10^5$  с $^{-1}$ ,  $\Delta t = 10$  мкс:

по вертикали: 1 — 1 МПа/дел, 2, 3 — 2 МПа/дел, 4 — 5 В/дел

сжатия (максимум свечения при  $t \approx 2.32$  мс), которые соответствуют отраженным волнам.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования впервые доказали возможность передачи детонационного

процесса из пузырьковой среды в находящуюся выше взрывчатую газовую смесь.

На первом этапе при подходе волны пузырьковой детонации снизу к границе среды воспламенившиеся пузырьки изолированы от газового объема приповерхностным слоем жидкости размером не менее  $8 \div 10$  мм; пузырьки, оказавшиеся ближе 8 мм к границе, не воспламеняются. После выхода пузырьковой детонации на границу среды происходит выброс части жидкости вверх с образованием пенистой среды.

На втором этапе по истечении времени  $0.1 \div 1.5$  мс наблюдается воспламенение небольшого объема горячей невоспламенившейся газовой смеси, находящегося в пенистой среде на расстоянии нескольких сантиметров от границы. После воспламенения газовой смеси по пенистой среде распространяется детонация со скоростью  $1\,500 \div 2\,000$  м/с. Этим объясняется независимость вероятности передачи детонации от расстояния между проволочкой и границей среды, если  $L \geq 4$  см ( $P \approx 10.5 \pm 3.8\%$ ). В случае расположения проволочки вблизи границы ( $L = 1$  см), когда плазменный разрядный пузырь при расширении может выходить за границу пузырьковой среды, появляется дополнительная возможность осуществить инициирование горячими продуктами взорвавшегося проводника или разогретой

плазмой. В этом случае вероятность воспламенения возрастает примерно в шесть раз ( $P \approx 63.5 \pm 4.5\%$ ).

На третьем этапе детонация, выходя из пенистой среды, инициирует детонацию в газовом объеме, в результате которой в верхнем участке трубы регистрируются взрывные волны и волны, отраженные от торца трубы и газожидкостной среды.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Кочетков И. И., Пинаев А. В.** Ударные и детонационные волны в жидкости и пузырьковых средах при взрыве проволочки // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 48, № 2. — С. 124–133.
2. **Пинаев А. В., Кочетков И. И.** Критическая энергия инициирования волны пузырьковой детонации при взрыве проволочки // Физика горения и взрыва. — 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, N 2. — P. 139–152. — DOI: 10.1007/s00193-012-0422-7.
4. **Кочетков И. И., Пинаев А. В.** Ударно-волновые процессы в воде и пузырьковых средах при взрыве проводника // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 6. — С. 109–119.

*Поступила в редакцию 1/ХП 2014 г.,  
в окончательном варианте — 18/VI 2015 г.*