

## ОБ УСЛОВИЯХ ИНИЦИИРОВАНИЯ ПУЗЫРЬКОВОЙ ДЕТОНАЦИИ

И. И. Кочетков, А. В. Пинаев

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

Экспериментально исследован процесс инициирования пузырьковой детонации в системе «инертная жидкость — пузырьки взрывчатого газа» с помощью детонационной волны в газе. Определены профили давления в волне сжатия в зависимости от длины секции инициирования и начального давления в ней взрывчатой смеси газов. Показано, что из-за влияния объема взрывчатого газа между диафрагмой и верхней границей пузырьковой среды давление во фронте инициирующей волны растет существенно медленней, чем начальное давление. Найдена оптимальная длина секции инициирования, и определены критические (минимальные) давления инициирования в ней и во фронте взрывной волны. Получено, что для фиксированной объемной концентрации газа в пузырьковой среде давление в секции инициирования незначительно возрастает с уменьшением длины секции.

Ключевые слова: пузырьковая среда, пузырьковая детонация, ударная волна, инициирование, газовая детонация, энергия инициирования.

## ВВЕДЕНИЕ

Основное внимание в предыдущих экспериментальных работах по пузырьковой детонации уделялось изучению самого явления, процесс ее инициирования детально исследован не был. Пузырьковую детонацию обычно возбуждали детонационной волной (ДВ) в секции инициирования (СИ), которая располагалась над вертикальной рабочей секцией трубы и была отделена от нее рвущейся диафрагмой. Способ инициирования горючих систем детонационными волнами в газовых смесях нашел широкое применение благодаря своей простоте и возможности синхронизации скоростной фоторегистрирующей аппаратуры с моментом инициирования газа высоковольтной искрой.

В работе [1] прямых измерений давления в ударной волне над верхней границей пузырьковой среды не проводили, давление во фронте волны оценивали по давлению в секции инициирования. При оценке давления предполагалось, что амплитуда инициирующих УВ близка к давлению сгорания взрывчатой смеси газов в замкнутом объеме  $p_\infty$  и пропорциональна начальному давлению  $p_{0i}$  в СИ (например,  $p_\infty = 17.07p_{0i}$  для смеси  $C_2H_2 + 2.5O_2$ ). Основанием для такого предположения послужил факт близкого совпадения значений  $p_\infty$  и осредненного давления в ударной волне, рас-

пространяющейся на начальном участке пузырьковой среды [2]. Исходя из этого в [1, 3] для некоторых систем «инертная жидкость — пузырьки взрывчатого газа» были приведены критические (минимальные) значения давления  $p_1^*$  во фронте волны в газе, при которых происходит возбуждение пузырьковой детонации.

Однако, поскольку объем между диафрагмой и верхней границей пузырьковой среды по условиям постановки эксперимента заполнен химически активным газом и сообщается с атмосферой, влияние такой «пробки» взрывчатого газа на амплитуду инициирующей волны может оказаться существенным. В газовой «пробке» после разрыва диафрагмы будет распространяться нестационарный детонационный процесс. Поэтому структура и параметры взрывной волны, падающей на границу пузырьковой среды, должны зависеть не только от начального давления в СИ и ее размеров, но также и от состава газовой смеси и размеров газовой «пробки» под диафрагмой. Отметим, что анализ структуры инициирующей волны может быть затруднен благодаря наличию границы пузырьковой среды, которая представляет собой неровную пенистую поверхность.

Во всех предыдущих работах по изучению пузырьковой детонации длина СИ в несколько раз превышала расстояние между диафрагмой и пузырьковой средой, которое составляло  $150 \div 500$  мм, а состав газа соответствовал составу газовой смеси в пузырьках. Поскольку

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 05-01-00129а).

область сжатия в волне пузырьковой детонации меньше 10 см, то наиболее вероятно, что возникновение пузырьковой детонации определяет давление непосредственно вблизи фронта УВ над границей пузырьковой среды.

Важная проблема инициирования детонации — это оптимизация основных параметров инициирования. Такими параметрами в рассматриваемой нами постановке экспериментов являются длина СИ  $l$  и начальное давление в СИ  $p_{0i}$ . Поэтому необходимо исследовать, как влияет уменьшение  $l$  и  $p_{0i}$  на параметры инициирующей волны и процесс возбуждения пузырьковой детонации. Для выяснения всех затронутых вопросов требуются экспериментальные измерения профилей давления взрывной волны в газе над границей пузырьковой среды.

Цель данной работы — экспериментально изучить процесс инициирования пузырьковой детонации, оптимизировать параметры инициирования, выяснить структуру и амплитуду инициирующей волны над пузырьковой средой, определить критические давления инициирования на фронте этой волны и критические давления в СИ  $p_{0i}^*$  в зависимости от ее длины.

## ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводили в вертикальной трубе из нержавеющей стали с внутренним диаметром 35 мм и длиной рабочей секции 4.5 м (рис. 1). Секция инициирования 1 расположена в верхней части трубы и отделена от нее рвущейся диафрагмой 8 из лавсановой пленки. В экспериментах длина СИ принималась равной  $l = 845, 345$  и  $145$  мм. Рабочую часть трубы 4 заполняли жидкостью, состоящей из 75 % воды и 25 % глицерина. Снизу трубы подавали пузырьки стехиометрической газовой смеси  $C_2H_2 + 2.5O_2$ , которая по трубке 2, расположенной вверху рабочей секции, свободно выходила в атмосферу. Секцию инициирования заполняли такой же смесью газов при  $p_{0i} = 0.04 \div 0.5$  МПа. Подрыв газовой смеси в СИ производили высоковольтным электрическим разрядом.

Объемную концентрацию пузырьков вычисляли по подъему пузырьковой среды до фиксированной высоты на величину  $\Delta h$  относительно начального уровня  $L$  жидкости по формуле  $\beta_0 = \Delta h / (L + \Delta h)$ . Генератор пузырьков создавал пузырьки диаметром  $d_0 = 2.5 \div$

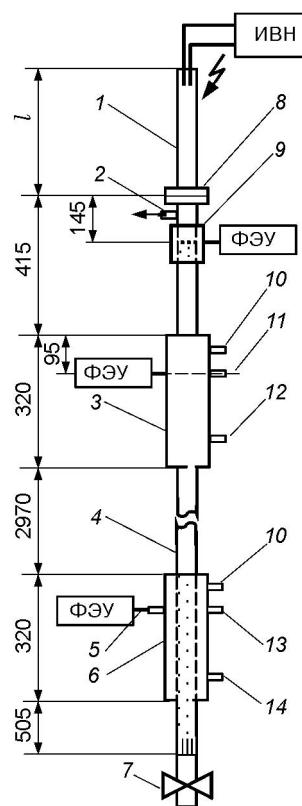


Рис. 1. Экспериментальная установка:

1 — секция инициирования; 2 — трубка вывода газа; 3 — верхняя измерительная секция; 4 — рабочая секция трубы; 5 — световод ФЭУ; 6 — нижняя измерительная секция; 7 — вентиль подачи газа; 8 — диафрагма; 9 — секция измерения уровня пузырьковой среды; 10 — датчики запуска осциллографов; 11–14 — измерительные пьезодатчики давления; ИВН — источник высокого напряжения; ФЭУ — фотоэлектронный умножитель

4 мм. Во всех опытах  $\beta_0 = 2\%$ , относительная погрешность измерения  $\beta_0$  не превышала 10%. Контроль положения границы пузырьковой среды перед инициированием осуществляли с помощью оптической секции 9, снабженной двумя диаметрально противоположными вертикальными окнами размером  $5 \times 50$  мм. Расстояние  $\lambda$  от диафрагмы до границы газожидкостной среды составляло 145 мм.

В верхней и нижней частях рабочей трубы располагались секции 3, 6, предназначенные для измерения давления и свечения пузырьков. В секциях имелись две вертикальные, диаметрально противоположные щели размером  $8 \times 240$  мм. Контроль возникновения пузырьковой детонации осуществляли по осциллограммам давления и свечения в секциях 3, 6.

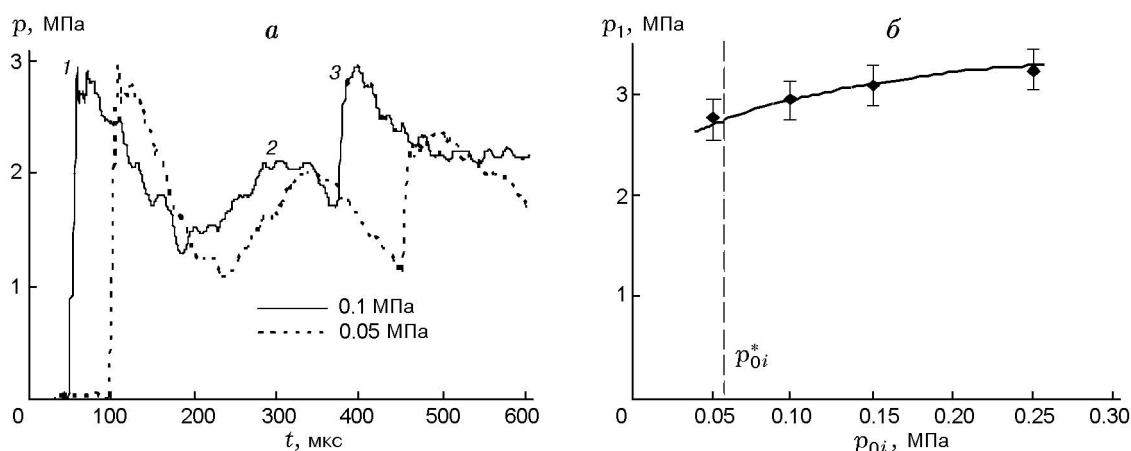


Рис. 2. Профили давлений (а) и значения  $p_1$  на фронте ДВ (б) при  $l = 845$  мм,  $l_{11} = 510$  мм,  $\lambda = \lambda_2$ :

а — 1, 2 — характерные области инициирующей волны, 3 — отраженная волна

Давление измеряли с помощью пьезокерамических датчиков 11–14 с собственной частотой  $\approx 300$  кГц и диаметром пьезоэлемента 2 мм [4, 5]. Сигналы датчиков верхней и нижней измерительных секций поступали соответственно на осциллографы С9-16 и С8-11 через истоковый повторитель. Данные с цифрового осциллографа С9-16 записывались на персональный компьютер. Значение давления рассчитывали по формуле  $p = C_0 U/a$ , где  $a$  — чувствительность датчика, полученная предварительной тарировкой,  $C_0$  — суммарная емкость пьезодатчика, коаксиального кабеля и истокового повторителя,  $U$  — напряжение на датчике.

Для каждой длины СИ были проведены две серии опытов. В первой серии ( $\lambda = \lambda_1 = 145$  мм), изменяя начальное давление  $p_{0i}$  в секции инициирования, определяли его критическое значение  $p_{0i}^*$ , при котором еще удавалось возбудить пузырьковую детонацию.

Во второй серии опытов, чтобы измерить профили давления в «пробке» газа над пузырьковой средой, часть жидкости сливали, так чтобы уровень пузырьковой среды был ниже датчика 11 либо 12 верхней измерительной секции. Контроль величины  $\beta_0$  в этом случае осуществляли по положению границы жидкости в прозрачных окнах секции 3. Расстояние от диафрагмы до датчика 11 было равно  $l_{11} = 510$  мм,  $0.55 \leq \lambda = \lambda_2 \leq 0.7$  м.

Непосредственно перед инициированием состав газа в «пробке» над пузырьковой средой был максимально близким к составу в условиях опытов по исследованию пузырьковой детона-

ции, поскольку снизу трубы взрывчатую смесь подавали около 5 мин. За это время взрывчатая смесь вытесняла воздух из объема под диафрагмой через трубку 2 в атмосферу.

Таким образом, инициирование пузырьковой детонации осуществлялось газовой взрывчатой смесью, заполняющей два участка трубы — секцию инициирования при давлении  $p_{0i}$  и свободный объем под диафрагмой при  $p_0 = 0.1$  МПа.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

1. На рис. 2, а представлены типичные осциллограммы давления ДВ в двух опытах при длине СИ  $l = 845$  мм. Здесь (и на рис. 3, а; 4, а) оба сигнала получены с датчика 11 при разных значениях  $p_{0i}$  и для наглядности осциллограммы приведены вместе, сдвинутыми на 50 и 100 мкс от начала координат. Профиль давления переднего фронта 1 инициирующей волны — треугольный, его длительность  $\tau_1 \approx 110 \div 120$  мкс. За ним на всех осциллограммах присутствуют плавный подъем давления 2 и крутой фронт отраженной от границы пузырьковой среды волны 3. С ростом  $p_{0i}$  амплитуда волны 3 растет быстрее, чем давление  $p_1$  на фронте 1.

Зависимость  $p_1(p_{0i})$  нелинейная, амплитуда переднего фронта слабо возрастает от  $p_1 = (2.8 \pm 0.2)$  МПа при  $p_{0i}^* = 0.065$  МПа до  $p_1 = (3.2 \pm 0.2)$  МПа при  $p_{0i} = 0.25$  МПа (см. рис. 2, б). В «пробке» газа при  $p_{0i} > p_{0i}^*$ , на базе между датчиками 11 и 12, средняя скорость распространения детонационных волн

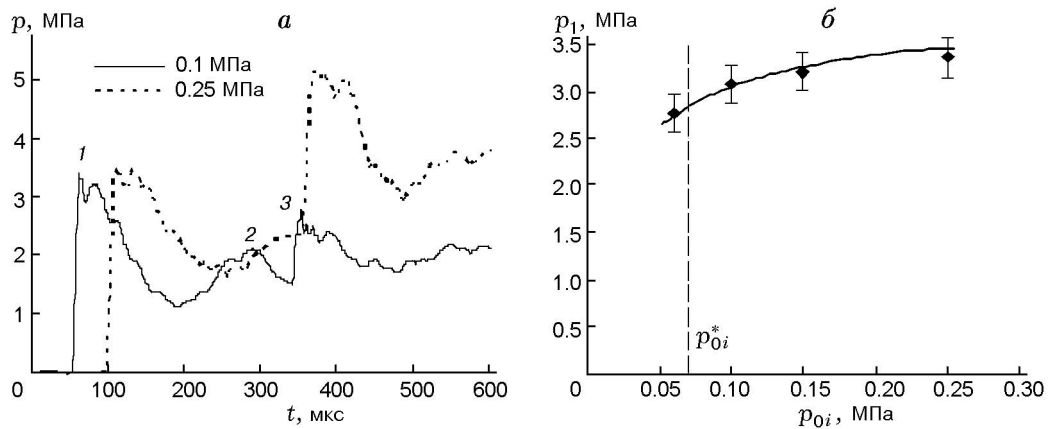


Рис. 3. Профили давлений (*a*) и значения  $p_1$  на фронте ДВ (*б*) при  $l = 345$  мм,  $l_{11} = 510$  мм,  $\lambda = \lambda_2$ :

*a* — 1, 2 — характерные области инициирующей волны, 3 — отраженная волна

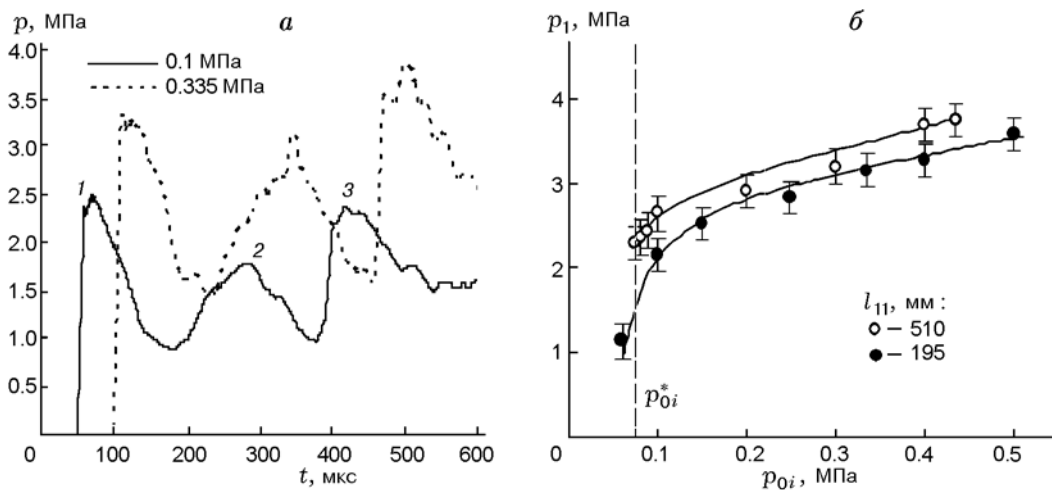


Рис. 4. Профили давлений (*a*) и значения  $p_1$  на фронте ДВ (*б*) при  $l = 145$  мм,  $l_{11} = 510$  мм (*a*) и 510 и 195 мм (*б*),  $\lambda = \lambda_2$ :

*a* — 1, 2 — характерные области инициирующей волны, 3 — отраженная волна

$D \approx 1800 \div 2460$  м/с. Уменьшение величины  $D$  по сравнению со скоростью детонации Чепмена — Жуге  $D_{CJ} = 2424$  м/с [6] наблюдается при малых значениях  $p_{0i}$  и связано с тем, что при инициировании слабыми ударными волнами в «пробке» газа волна не успевает выйти на режим стационарной детонации.

2. Выясним, воздействие какой области волны определяет инициирование пузырьковой детонации. В опытах первой серии регистрация давления и свечения в пузырьковой среде в поперечном сечении трубы в месте расположения датчика 11 показывает, что воспламенение пузырьков происходит вблизи переднего ударного фронта. Из [7] следует, что в волне

пузырьковой детонации разрушение крупных пузырьков на мелкие с размером менее  $0.2 \div 0.5$  мм происходит за время порядка 100 мкс. Если во фронте 1 не происходит воспламенение крупных пузырьков ( $p_{0i} \leq p_{0i}^*$ ), то к моменту прихода следующей области волны среда содержит только мелкие пузырьки, которые не воспламеняются из-за слабого сжатия. Эти факты указывают на то, что основную роль в инициировании пузырьковой детонации играет область сжатия вблизи переднего фронта 1.

Зависимость амплитуды переднего фронта инициирующей волны от  $p_{0i}$  для СИ длиной  $l = 345$  мм показана на рис. 3, б. Амплитуда ДВ, как и при  $l = 854$  мм, слабо возрастает в

интервале давлений  $p_{0i} = 0.07 \div 0.25$  МПа, изменяясь соответственно от  $p_1 = (2.8 \pm 0.2)$  МПа до  $p_1 = (3.3 \pm 0.2)$  МПа с учетом погрешности измерений. В том же диапазоне  $p_{0i}$   $\tau_1 \approx 110$  мкс.

Данные, полученные при  $l = 345$  мм, показывают, что аналогично опытам с  $l = 845$  мм с ростом давления в СИ амплитуда отраженной волны увеличивается быстрее, чем давление на фронте. Кривые зависимости  $p_1(p_{0i})$  для  $l = 845$  и  $345$  мм практически не отличаются между собой (см. рис. 2, б и рис. 3, б), что подтверждает высказанное выше предположение о влиянии химически активного газа под диафрагмой на формирование инициирующей волны.

**3.** Характерные осциллограммы давления инициирующей волны для самой короткой СИ ( $l = 145$  мм) представлены на рис. 4, а. Каким-либо заметных качественных изменений профиля волны по сравнению с предыдущими опытами здесь не произошло. Можно отметить лишь незначительное уменьшение  $\tau_1$  со  $120 \div 110$  мкс ( $l = 845$  мм) до  $70 \div 90$  мкс ( $l = 145$  мм). Близкое положение волн 1–3 на временной оси (см. рис. 2, а; 3, а; 4, а), несмотря на укорочение СИ сначала в 2.5, а затем почти в 6 раз по сравнению с начальной длиной  $l = 845$  мм, свидетельствует об уменьшении средней скорости распространения нестационарной детонации не только в «пробке» взрывчатого газа, но и в СИ.

На рис. 4, б приведен характерный график давления на фронте 1 для СИ длиной  $l = 145$  мм. Здесь уже прослеживается более резкий спад амплитуды инициирующей волны, наблюдаемый при  $p_{0i} < 0.15$  МПа. Величина  $\tau_1$  зависит от  $p_{0i}$  и возрастает в интервале  $70 \div 90$  мкс при изменении  $p_{0i}$  в диапазоне  $0.06 \div 0.5$  МПа. Критическое давление в СИ составляет  $p_{0i}^* = 0.075$  МПа, а критическое давление во фронте инициирующей волны уменьшилось до  $p_1^* = (2 \pm 0.2)$  МПа, что примерно в 1.5 раза меньше  $p_{CJ} = 3.384$  МПа [6] (при  $p_0 = 0.1$  МПа) и свидетельствует о низкой скорости распространения детонационного процесса ( $D < D_{CJ}$ ).

**4.** Если выходящая из СИ волна достаточно мощная для создания условий перехода на установившийся детонационный режим в «пробке» газа под диафрагмой, то на расстоянии 0.5 м от диафрагмы давление на фронте волны  $p_1 \approx 3.0 \div 3.5$  МПа. Условие перехода в режим установившейся детонации на этом рас-

стоянии выполняется, по-видимому, при  $p_{0i} \geq 0.1$  МПа для  $l = 845$  и  $345$  мм и при  $p_{0i} \geq 0.25$  МПа для  $l = 145$  мм. При этом условии для смеси  $C_2H_2 + 2.5O_2$  регистрируемое на фронте 1 давление оказывается близким к значению в плоскости Чепмена — Жуге.

Из проведенных экспериментов следует еще один полезный вывод, касающийся определения критической амплитуды давления на фронте 1. Опыты с длинными СИ ( $l = 845$  и  $345$  мм) могли привести к заключению, что инициирование пузырьковой детонации происходит при минимальном давлении на фронте  $p_1^* \approx (2.7 \pm 0.1)$  МПа (см. рис. 2, б и рис. 3, б), но эксперименты, выполненные с короткой СИ ( $l = 145$  мм), показали, что для инициирования пузырьковой детонации при том же значении  $\beta_0$  достаточно меньшей амплитуды —  $p_1^* = (2 \pm 0.2)$  МПа. Несоответствие крити-

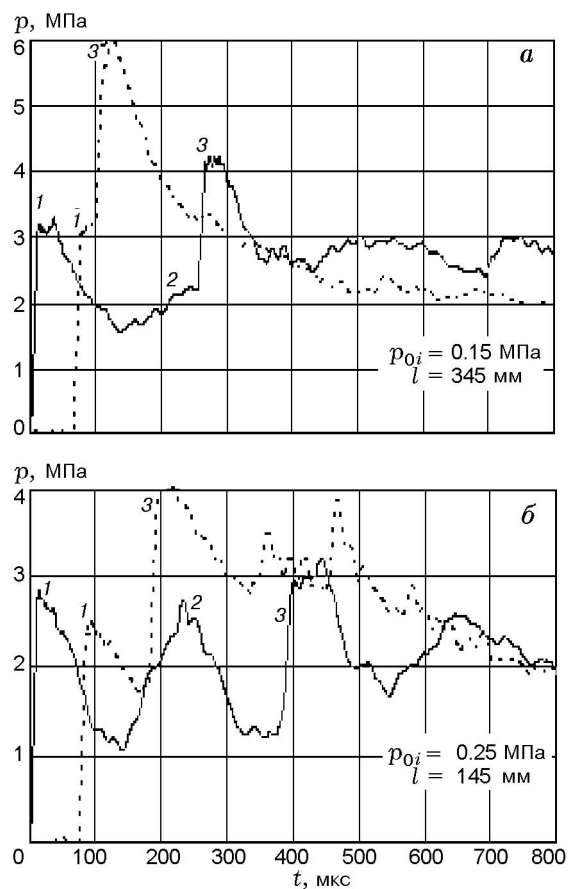


Рис. 5. Осциллограммы давлений, регистрируемые датчиками 11 и 12,  $\lambda_2 = 0.7$  м:

1, 2 — характерные области инициирующей волны, 3 — отраженная волна

ческих давлений вызвано тем, что из-за более мощного воздействия УВ, выходящей из длинной СИ, в «пробке» взрывчатого газа происходит ускоренный переход (по сравнению с СИ длиной 145 мм) к нормальному детонационному режиму.

5. Расстояние между диафрагмой и датчиком 11, равное 510 мм, близко соответствовало случаям наибольшего удаления границы пузырьковой среды от диафрагмы в предыдущих работах по пузырьковой детонации. Приведем также результаты измерения давления датчиком 12 в инициирующей волне над границей пузырьковой среды. Если датчик 11 регистрирует волну с описанной выше структурой, то в сечении измерительной секции на уровне датчика 12 ее профиль давления изменяется. Датчик 12 регистрирует фронт инициирующей волны 1 и отраженный от границы пузырьковой среды фронт волны 3 с амплитудой 6.0 МПа (см. рис. 5,а). На осциллограмме рис. 5,б амплитуда давления фронта 3 составляет 4.0 МПа.

В опыте на рис. 5,а скорость детонации  $D = 2428$  м/с, что хорошо согласуется с расчетным значением  $D_{СД} = 2424$  м/с, средняя скорость отраженной волны между датчиками 12 и 11  $v_3 = 1085$  м/с. В опыте на рис. 5,б  $D = 1960$  м/с,  $v_3 = 850$  м/с. Из анализа подобных осциллограмм следует, что возрастание скорости детонации в «пробке» газа и амплитуды отраженной волны в большей степени зависит от длины СИ, чем от давления  $p_{0i}$ .

6. В последних опытах верхняя часть трубы была укорочена настолько, что расстояние от диафрагмы до датчика 11 составляло  $l_{11} = 195$  мм. Это позволило наблюдать инициирующую волну ближе к диафрагме и получить более полное представление об инициировании пузырьковой детонации для экспериментальной установки с размерами, приведенными на рис. 1. При СИ длиной  $l = 145$  мм структура инициирующей волны в плоскости датчика 11 практически совпадает со структурой волн, регистрируемых тем же датчиком в предыдущих опытах, а значения давлений на фронте 1 близки между собой (см. рис. 4,б).

Значения критических параметров инициирования пузырьковой детонации сведены в таблицу. Здесь в последнем столбце приведены безразмерные (по отношению к энергии газа при  $l_{\max}$ ) критические энергии газа в СИ, вычисляемые по формуле  $\bar{E}_i^*(l) =$

$l$ , мм	$p_{0i}^*$ , МПа	$p_1^*$ , МПа	$\bar{E}_i^*(l)$
845	0.065	$2.7 \pm 0.1$	1
345	0.07	$2.7 \pm 0.1$	0.44
145	0.075	$2 \pm 0.2$	0.2

$E_i^*(l)/E_i^*(l_{\max}) = p_{0i}^*(l)/p_{0i}^*(l_{\max})(l/l_{\max})$ , где  $l_{\max} = 845$  мм. В формуле учтена зависимость количества газа в СИ от соответствующих значений  $p_{0i}^*$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основную роль в формировании инициирующей волны играет газовая «пробка», поэтому процесс возбуждения пузырьковой детонации и значения критического давления инициирования должны зависеть от состава газа под диафрагмой. Амплитуда инициирующей ударной волны слабо меняется с изменением начального давления в СИ, и при  $p_{0i} > p_{0i}^*$  давление на фронте близко к  $p_{СД}$ .

Определение критической амплитуды на фронте взрывной волны при инициировании пузырьковой детонации с помощью детонационной волны может быть достоверным при малой длине СИ (в наших опытах  $p_1^* \approx (2 \pm 0.2)$  МПа).

Оптимизация процесса инициирования пузырьковой детонации достигнута путем укорочения СИ почти в шесть раз. При этом общая энергия газа в СИ, необходимая для возбуждения пузырьковой детонации, снижается в пять раз.

## ЛИТЕРАТУРА

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. 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.
4. Пинаев А. В. Измерение давления за фронтом

- волны детонации в гетерогенной системе газ — пленка // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19, № 1. С. 105–111.
5. **Пинаев А. В., Лямин Г. А.** Пьезоэлектрические датчики давления, методы их тарирования // Приборы и техника эксперимента. 1992. № 2. С. 236–239.
6. **Николаев Ю. А., Топчиян М. Е.** Расчет равновесных течений в детонационных волнах в газах // Физика горения и взрыва. 1977. Т. 13, № 3. С. 393–404.
7. **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.

*Поступила в редакцию 28/XII 2005 г.*

---