

**ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ПУЗЫРЬКОВ
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛН ДЕТОНАЦИИ***А. И. Сычев**Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,
630090 Новосибирск*

Экспериментально изучены детонационные волны в различных монодисперсных средах, содержащих пузырьки газа заданного диаметра. Исследовано влияние размера пузырьков на критические условия инициирования, структуру и свойства волн детонации в пузырьковых средах. Обнаружены нижний и верхний пределы существования детонационных волн по диаметру пузырьков. Определена область существования волн детонации. Выявлены особенности поведения пузырьков газа различного диаметра в волне детонации.

Детонация — автоволновой самоподдерживающийся процесс. Параметры волн детонации не зависят от способа инициирования и определяют свойства среды. Самоподдерживаемость детонационных волн (ДВ) обеспечивается энерговыделением в среде.

Системы жидкость — пузырьки газа — пример среды с дискретным распределением источников химической энергии. Энерговыделение в пузырьковых средах при распространении ДВ происходит вследствие взаимодействия жидкой и газовой фаз. Повышение давления в жидкости вызывает сжатие пузырьков, газ в пузырьках, нагреваясь при сжатии, воспламеняется, пузырьки расширяются и излучают в окружающую жидкость ударные волны (УВ). Формирующийся при этом профиль давления волн детонации определяется физико-химическими свойствами пузырьковой среды, в частности размером пузырьков.

Таким образом, диаметр пузырьков в жидкости — важный параметр системы. Выяснить влияние размера пузырьков газа в жидкости на критические условия инициирования, структуру и параметры ДВ в пузырьковых средах — цель настоящей работы.

Экспериментальные исследования выполнены на вертикально расположенной гидродинамической ударной трубе из нержавеющей стали высотой 4,3 м и внутренним диаметром 40 мм, состоящей из секций высокого и низкого давления с разрывной диафрагмой между ними [1]. Секцию низкого давления заполняли жидкостью, пузырьки в которой формировались при прохождении газа через систему 9–11 капиллярных отверстий заданного диаметра (высота столба создаваемой пузырьковой среды 3,6 м).

Объемную концентрацию газовой фазы β_0 определяли по подъему столба газожидкостной среды при прохождении пузырьков через жидкость. Опыты проводили при $0,5 \leq \beta_0 \leq 6\%$. Давление на поверхности жидкости с пузырьками $P_0 = 1$ атм.

Пузырьковую детонацию инициировали ударными волнами, генерируемыми в газожидкостной среде при сжигании ацетиленокислородной стехиометрической смеси в секции высокого давления. Интенсивность инициирующих УВ варьировали изменением начального давления взрывчатой газовой смеси.

Параметры волн пузырьковой детонации регистрировали установленными по длине ударной трубы пьезоэлектрическими датчиками давления, сигналы с которых подавали на осциллографы ОК-33М, С8-17 и С9-16 (постоянная времени измерительной цепи каждого датчика $> 10^{-3}$ с). Све-

α	d_1 , мм	k_1	d_2 , мм	k_2	d_3 , мм	k_3	d_4 , мм	k_4
0	$2,0 \pm 0,2$	0,7	$2,7 \pm 0,3$	0,7	—	—	$5,2 \pm 0,4$	0,6
0,25	$1,8 \pm 0,1$	1,0	$2,4 \pm 0,1$	0,9	$4,0 \pm 0,2$	0,8	$5,1 \pm 0,3$	0,8
0,5	$1,9 \pm 0,1$	1,0	$2,5 \pm 0,1$	0,9	$3,8 \pm 0,2$	0,8	$5,0 \pm 0,3$	0,8

чение пузырьковой среды, сопровождающее детонационный процесс, фиксировали фотоэлектронными умножителями ФЭУ-102, оптические вводы которых располагали диаметрально противоположно датчикам давления. Фоторегистрацию ДВ осуществляли через окна оптической секции камерой СФР в режимах фоторазвертки и покадровой съемки (тенева картина с подсветкой импульсной лампой ИФП-250).

Детонационные волны изучены в системах типа химически неактивная жидкость (водоглицериновые растворы с объемной концентрацией глицерина $\alpha = 0, 0,25, 0,5$) — пузырьки взрывчатого газа (ацетиленокислородная стехиометрическая смесь $C_2H_2 + 2,5 O_2$).

На рис. 1 представлены фотографии пузырьков в исследованных монодисперсных средах. Видно, что распределение пузырьков газа в жидкости хаотичное, но близко к равномерному. Форма пузырьков, вообще говоря, несферична. Лишь мелкие пузырьки близки по форме к сферическим, более крупные представляют собой сплюснутые эллипсоиды вращения (сфероиды). Форма пузырьков искажается вследствие гидродинамического воздействия при всплытии пузырьков газа в жидкости.

В таблице приведены параметры пузырьков в жидкостях различной вязкости (d_i — диаметр пузырьков, $k_i = (b/a)_i$ — величина, характеризующая отклонение формы пузырька от сферической, a, b — большая и малая оси сфероид (на фотографиях — эллипса)). Величины a, b для каждого пузырька измерялись микрометром ИЗА-2 по фотографиям, аналогичным представленным на рис. 1. Эффективный диаметр пузырька определялся из условия равенства объемов сфероид и сферы: $d = a(b/a)^{1/3}$. Значения d_i и k_i получены усреднением результатов 10 измерений. Согласно данным таблицы, степень монодисперсности пузырьков сред снижается с уменьшением вязкости жидкости; отклонение формы пузырьков от сферической возрастает с увеличением диаметра пузырьков и при уменьшении вязкости жидкости.

Пульсационный характер сигналов датчика давления и ФЭУ, приведенных на рис. 2, есть следствие излучения воспламенившимися пузырь-

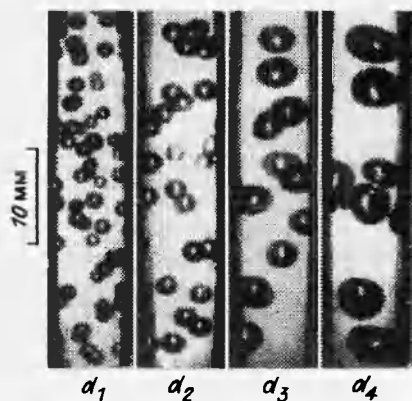


Рис. 1. Фотографии пузырьков. $\alpha = 0,5, \beta_0 = 0,5-1\%$.

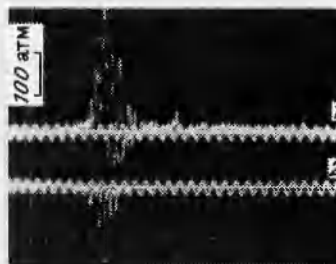


Рис. 2. Осциллограмма давления ДВ (1) и свечения пузырьковой среды (2). $\alpha = 0,5, \beta_0 = 0,5\%, d = d_2$, период синусоиды $T = 10$ мкс.

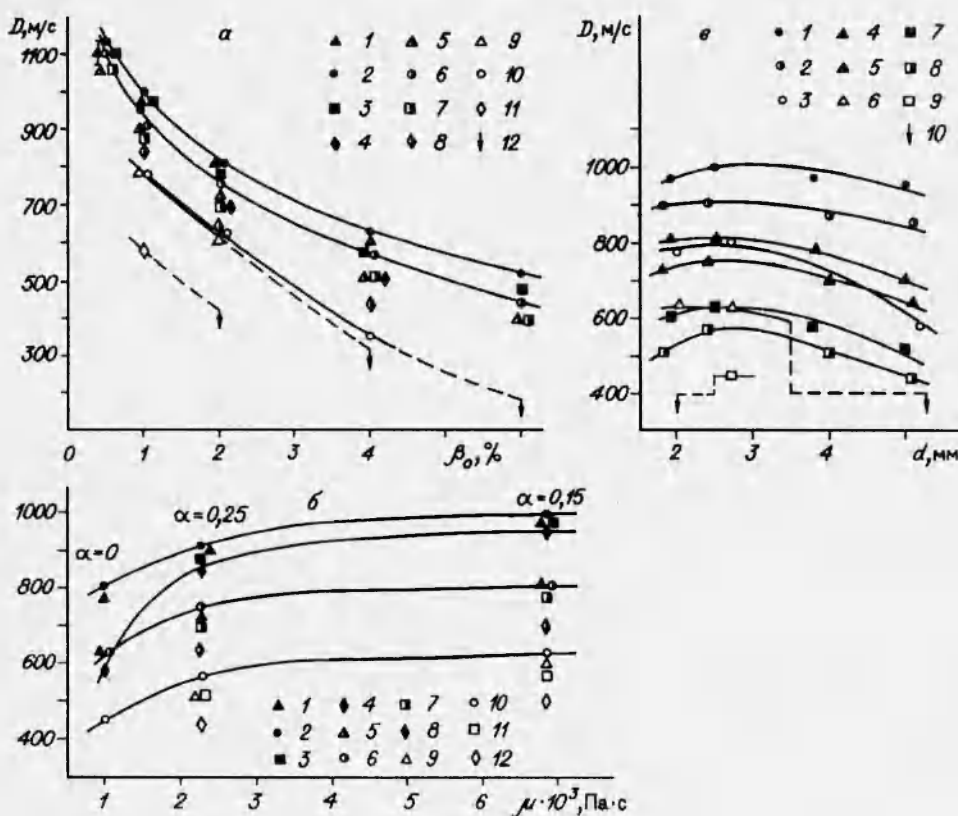


Рис. 3. Зависимости $D(\beta_0)$ (а), $D(\mu)$ (б) и $D(d)$ (в).

$a - \alpha = 0,5$ (1-4), 0,25 (5-8) и 0 (9-11); 1, 5, 9 — $d = d_1$; 2, 6, 10 — $d = d_2$; 3, 7 — $d = d_3$; 4, 8, 11 — $d = d_4$; 12 — детонация отсутствует; б — $\beta_0 = 1$ (1-4), 2 (5-8) и 4% (9-12); 1, 5, 9 — $d = d_1$; 2, 6, 10 — $d = d_2$; 3, 7, 11 — $d = d_3$; 4, 8, 12 — $d = d_4$; в — $\alpha = 0,5$ (1, 4, 7), 0,25 (2, 5, 8) и 0 (3, 6, 9); $\beta_0 = 1$ (1-3), 2 (4-6) и 4% (7-9); 10 — детонация отсутствует.

ками ударных волн и свечения. Стохастичность пульсаций обусловлена хаотичностью распределения пузырьков в жидкости.

Установлено, что структура ДВ в различных монодисперсных средах качественно идентична, а количественные характеристики находятся в зависимости от размера пузырьков: с увеличением диаметра пузырьков длительность волны возрастает. Так, при увеличении диаметра пузырьков от $d_1 = 1,9$ до $d_4 = 5,0$ мм ($\alpha = 0,5$) длительность волны τ_b (на уровне 0,1 от максимума давления) возрастает от ~ 25 до ~ 50 мкс. Таким образом, имеет место корреляция между размером пузырьков в системе и длительностью волны детонации.

Отметим, что величина τ_b при постоянных параметрах системы колеблется в широком диапазоне (разброс достигает $\pm 50\%$). Приведенные данные получены усреднением результатов 10-15 опытов; во всех системах длительность пульсаций давления $\tau_{\Pi} = 5 \pm 2$ мкс.

Пространственная протяженность волны детонации $\Delta l = D\Delta\tau_b$ — сложная функция параметров системы, так как скорость распространения ДВ зависит от концентрации газовой фазы, вязкости жидкого компонента системы, диаметра пузырьков (рис. 3). В исследованных пузырьковых средах $\Delta l = (1,5-5,0)$ см.

На рис. 3 приведены результаты измерения скорости распространения ДВ в различных монодисперсных средах (каждая точка — среднее

нескольких опытов). Общий вид зависимостей $D(\beta_0)$ в системах, содержащих пузырьки газа разного диаметра, качественно сходный: с увеличением β_0 скорость распространения ДВ уменьшается вплоть до затухания детонации (верхний предел существования ДВ по концентрации газовой фазы [2]).

Существенно влияет на величину D вязкость μ жидкого компонента пузырьковой среды (см. рис. 3,б). С уменьшением μ скорость распространения волн падает. В системах, вязкость жидкого компонента которых ниже некоторого предельного значения, детонация отсутствует (предел по вязкости [2]). Роль вязкости жидкого компонента системы при детонации в пузырьковых средах изучена в [2].

Влияние размера пузырьков на скорость распространения волн детонации (при фиксированных β_0) прослежена на рис. 3,в. Зависимости $D(d)$ носят немонотонный характер, скорость распространения ДВ максимальна при некотором определенном диаметре пузырьков газа. При меньших или больших размерах пузырьков величина D уменьшается. Обнаружены пределы существования ДВ по диаметру пузырьков газа (верхний и нижний). Так, при $\alpha = 0$ детонация отсутствует в системах, в которых $d \geq d_4$ (при $\beta_0 \geq 2\%$) и $d \leq d_1$ ($\beta_0 \geq 4\%$).

Влияние размера пузырьков газа на скорость распространения ДВ (при неизменных остальных параметрах системы) и наличие пределов существования детонации указывают на протекание в волне диссипативных процессов.

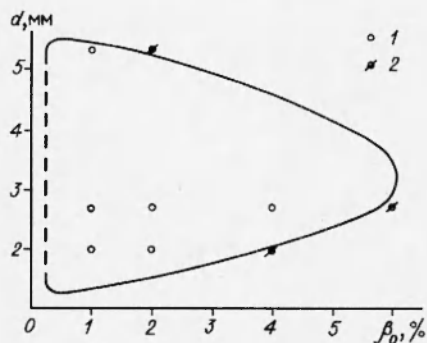


Рис. 4. Область существования волн пузырьковой детонации при $\alpha = 0$. 1 — детонация, 2 — детонация отсутствует.

Полученные данные позволяют определить область существования ДВ в исследованных системах при $\alpha = 0$. На рис. 4 нижний предел по концентрации газовой фазы условно принят равным 0,25 %, поскольку при меньших значениях β_0 само понятие «пузырьковая среда» теряет смысл, так как расстояния между пузырьками становятся сопоставимыми с диаметром трубы.

Вне области существования инициирующая УВ может воспламенять пузырьки газа в жидкости, но ДВ не образуется; по мере распространения УВ ослабевает, и воспламенение пузырьков прекращается. С увеличением вязкости жидкого компонента системы область существования ДВ расширяется.

Критическое значение давления инициирующей ударной волны P_1^* возрастает при увеличении концентрации газовой фазы и уменьшении вязкости жидкого компонента системы и зависит от диаметра пузырьков (наименьшие значения P_1^* наблюдаются в системах с диаметром пузырьков $d = d_2$). В исследованных пузырьковых средах $P_1^* = 17-60$ атм. В [3] отмечено отсутствие воспламенения в системе $\alpha = 0$, содержащей пузырьки диаметром 0,5–1,0 мм, при $P_1^* \leq 80$ атм.

С целью выяснения поведения пузырьков газа различного диаметра в ДВ проведены оптические исследования. Взаимодействие пузырьков с ДВ приводит к их сжатию и воспламенению. Высвобождение химической энергии вызывает повышение давления газа в пузырьке, при этом сжатие прекращается, и пузырек расширяется (рис. 5,а). В процессе взаимодействия пузырька газа с волной детонации форма пузырька искажается (см. рис. 5,б). На некоторой стадии сжатия формируется кумулятивная струя

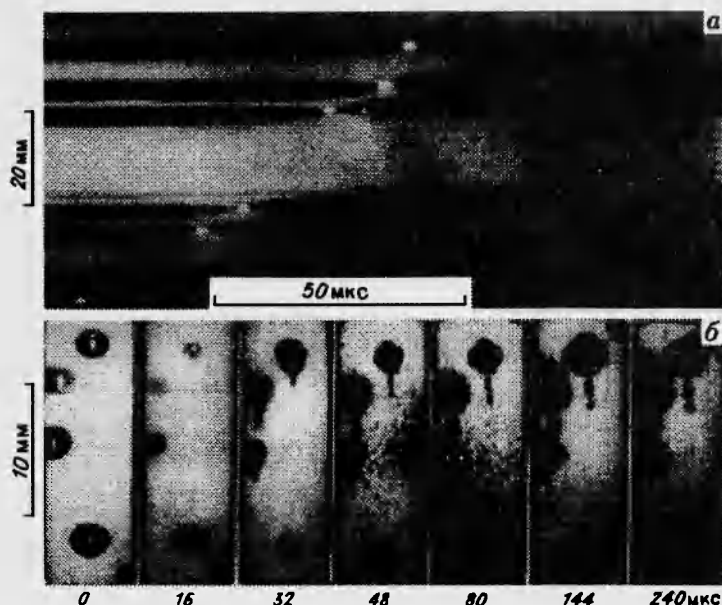


Рис. 5. Фоторегистрограмма (а) и кинограмма (б) пузырьков газа в ДВ. $\alpha = 0,25$, $\beta_0 = 1\%$, $d = d_4$ (а) и d_2 (б).

жидкости, пронизывающая пузырек насквозь.

После расширения возможны последующие более слабые сжатия и расширения пузырьков. Данный факт указывает на неравновесность состояния среды за ДВ. В конечном итоге, совершив 2–3 осцилляции, пузырьки разрушаются. После прохождения ДВ жидкость содержит большое количество пузырьков диаметром < 1 мм.

На рис. 6 представлены осциллограммы давления и осредненного с помощью интегрирующей РС-цепочки (по методике [4]) профиля давления ДВ. Анализ фоторазверток ДВ позволяет получить значения степени сжатия пузырьков: на рис. 7 приведены зависимости d/d_0 от времени t (d_0, d — начальный и текущий диаметры пузырька).

Взаимодействуя с ДВ, пузырьки сжимаются до момента воспламенения. Время сжатия зависит от диаметра пузырьков: $\tau_c = 10\text{--}15, 15\text{--}20, 30\text{--}40$ мкс для пузырьков с $d = d_1, d_2, d_4$ соответственно.

Пузырьки различного диаметра воспламеняются при $d_0/d_c \approx 3,5 \pm 0,3$; после воспламенения они расширяются до значения $d_p/d_0 \approx 1,3\text{--}1,7$ за время $\tau_p = (1,5\text{--}2,0)\tau_c$ (d_c, d_p — минимальный при сжатии и максимальный при расширении диаметры пузырьков).

Средняя скорость поверхности пузырьков при сжатии (от уровня $d/d_0 = 0,9$ до момента воспламенения) составляет 70–110 м/с; при последующем расши-

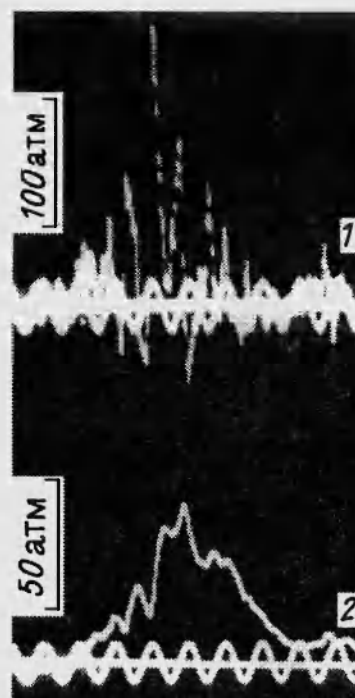


Рис. 6. Осциллограмма давления ДВ (1) и осредненного по пульсациям профиля давления (2). $\alpha = 0,5$, $\beta_0 = 1\%$, $d = d_2$.

рении (от момента воспламенения до $d/d_0 = 0,9$) ее величина достигает 120–180 м/с. Более высокая скорость расширения пузырьков — следствие повышения давления при воспламенении газа в пузырьках.

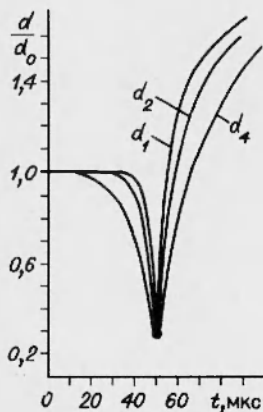


Рис. 7. Кривые сжатия пузырьков в волне детонации. $\alpha = 0,25$, $\beta_0 = 1\%$.

Детонация в пузырьковых средах представляет собой совокупность гидродинамических и физико-химических процессов. Энерговыделение в среде (воспламенение и горение пузырьков) происходит при переменных параметрах среды внутри пузырька (в частности, температуры).

Изменение температуры газа в пузырьке происходит в результате действия многих факторов. С одной стороны, температура повышается вследствие сжатия пузырька в поле давления ДВ. С другой стороны, газ в пузырьке охлаждается. Так, существуют теплопотери, обусловленные процессом теплопередачи через стенки пузырька, следствием которых является отклонение от адиабатичности сжатия газа в пузырьке.

В случае деформации первоначальной формы площадь поверхности пузырька возрастает. Более того, как показывают данные оптических исследований поведения пузырьков в волне детонации [3, 1] (см. рис. 5) и результаты изучения кавитационных пузырьков [5], поверхность пузырька при схлопывании неустойчива.

Общая деформация формы пузырька с образованием кумулятивной струи жидкости, пронизывающей пузырек насквозь, происходит из-за неоднородности поля давления в окружающей жидкости (следствие взаимодействия пузырьков с ДВ), а также при поступательном движении пузырька в жидкости. Другой тип искажения — неустойчивость поверхности раздела между жидкостью и газом при ускоренном движении (неустойчивость Тейлора). Вследствие искажения стенок пузырька возрастает площадь поверхности пузырька, что приводит к увеличению теплопотерь за счет теплопередачи через границу раздела газ — жидкость.

Тепло идет также на нагрев и испарение микрокапель жидкости, срывающихся со стенок пузырька и образующихся в результате диспергирования кумулятивной струи жидкости в объеме пузырька. Кроме того, отклонение формы пузырька от сферической приводит к несимметричности самого процесса сжатия («неидеальная» кумуляция), т. е. во внутреннюю энергию газа в пузырьке переходит лишь часть кинетической энергии жидкости.

В результате отклонения от адиабатического закона и из-за несимметричности процесса сжатия температура газа в пузырьке оказывается ниже, чем в случае идеального сжатия.

Выполним некоторые оценки. Рассмотрим сжатие пузырька сферической формы. Без теплопотерь сжатие пузырька в ДВ происходит адиабатически. При сжатии пузырька от начального радиуса R_0 до R температура газа в пузырьке повышается от начального значения T_0 до $T = T_0(n)^{3(\gamma-1)}$, где $n = R_0/R$ — степень сжатия пузырька.

Выясним роль теплопотерь через стенки пузырька. Оценку величины T снизу можно получить, полагая, что пузырек с температурой газа T_b охлаждается за время $t = \tau_c$ (τ_c — время сжатия пузырька в ДВ). Среднюю температуру газа T в пузырьке при $R = \text{const}$ в момент t можно определить по формуле, описывающей процесс охлаждения газа в пузырьке

ке вследствие теплопроводности [6]:

$$\theta = \frac{T - T_0}{T_{\text{в}} - T_0} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^2} \exp\left(-k^2 \pi^2 \frac{a_0}{R^2} t\right),$$

где $T_{\text{в}}$ — средняя температура газа в пузырьке радиусом R при $t = 0$; a_0 — коэффициент температуропроводности газа; T_0 — температура жидкости (повышением температуры жидкости можно пренебречь).

Охлаждение газа в пузырьке может привести к тому, что он не воспламенится. Воспламенение не произойдет, если задержка воспламенения газовой смеси $t_3 > \tau_c$. Величина t_3 — сложная функция переменных при сжатии параметров среды внутри пузырька. Поэтому для оценки радиуса пузырька снизу используем более сильное условие отсутствия воспламенения: $\tau_{\text{и}} > \tau_c$ ($\tau_{\text{и}}$ — период индукции химических реакций при T).

Для газовой смеси $\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5 \text{O}_2$ период индукции определим по формуле [7]:

$$\tau_{\text{и}} = 3,38 \cdot 10^{-11} [\text{O}_2]^{-0,5} [\text{C}_2\text{H}_2]^{-0,5} \exp(17400/RT) \text{ моль} \cdot \text{с/л}$$

(R — универсальная газовая постоянная). Время сжатия пузырька можно оценить по известной формуле Рэлея, описывающей сжатие пустой полости при внезапном повышении давления в жидкости $\tau_c = 0,915 R_0 (\rho_{\text{ж}}/\Delta p)^{0,5}$, где $\rho_{\text{ж}}$ — плотность воды, Δp — давление в ДВ.

При $T_0 = 293 \text{ К}$, $a_0 = 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, $\gamma = 1,33$, $n = 3,5$ (средняя степень сжатия пузырька при воспламенении в волне детонации), $\Delta p = 70 \text{ атм}$ (значения в максимуме осредненного по пульсациям профиля давления ДВ $\Delta p = 60\text{--}80 \text{ атм}$) получаем, что условие отсутствия воспламенения выполняется для пузырьков, радиус которых меньше $R_0 = 0,4 \text{ мм}$ (при этом $\tau_{\text{и}} = \tau_c \approx 4,5 \text{ мкс}$, $T_{\text{в}} = 1000 \text{ К}$, $T = 800 \text{ К}$, $\Delta T = T_{\text{в}} - T = 200 \text{ К}$, $\theta = 0,73$).

Таким образом, в результате теплотерь через границу раздела газ — жидкость газ в пузырьках, размер которых меньше критического, не воспламеняется.

При $\alpha = 0$ экспериментально обнаружены нижний ($R_1 = d_1/2 = 1 \text{ мм}$) и верхний ($R_4 = d_4/2 = 2,6 \text{ мм}$) пределы существования детонации по размеру пузырьков. Аналогичные оценки, проведенные для пузырьков с $R = R_1$ и R_4 , показывают, что газ охлаждается на величину $\Delta T = 115$ и 80 К соответственно от адиабатического закона при сжатии пузырьков радиусом R_1 и R_4). При этом период индукции химических реакций в пузырьках ($\tau_{\text{и}} = 1,2$ и $0,7 \text{ мкс}$ соответственно) существенно меньше времени сжатия ($\tau_c = 10\text{--}15$ и $30\text{--}40 \text{ мкс}$ — экспериментальные данные; по формуле Рэлея $\tau_c = 11$ и 28 мкс).

Таким образом, полученная оценка дает заниженное значение предельного размера пузырьков. Кроме того, механизм теплотерь газа через стенки пузырька сферической формы не объясняет наличие верхнего предела детонации по размеру пузырьков. Отмеченные факты указывают на существование дополнительных теплотерь газа в пузырьках при сжатии.

Оценим влияние теплотерь вследствие искажения поверхности пузырька. Экспериментальные количественные данные о степени искажения поверхности пузырька при сжатии отсутствуют. Поэтому оценим, насколько должна увеличиться площадь его поверхности, чтобы воспламенение газа не произошло.

Условие отсутствия воспламенения $\tau_{\text{ж}} = \tau_{\text{с}}$ для пузырьков радиусом R_1 и R_4 , сжатых в 3,5 раза, выполняется, если газ охлаждается до температуры 750 и 700 К соответственно. Учитывая условие сохранения объема содержащегося в пузырьках газа получаем, что поверхность пузырьков R_1 и R_4 должна увеличиться в 2,5 и 4,5 раза.

Оценим роль теплопотерь на нагрев и испарение микрокапель жидкости в объеме пузырька. Определим массу жидкости, нагрев, испарение и нагрев паров которой приводит к снижению температуры газа в пузырьке от $T_{\text{в}}$ до значения T , при котором воспламенение газа не произойдет. Расчет выполним при следующих значениях параметров: удельные теплоемкости газа, жидкости и пара $c_{\text{г}}^{\text{ж}} = 1,46 \cdot 10^3$ Дж/кг·К, $c_{\text{п}}^{\text{ж}} = 4,2 \cdot 10^3$ Дж/кг·К, $c_{\text{п}}^{\text{п}} = 2,2 \cdot 10^3$ Дж/кг·К соответственно; $T_{\text{к}} = 650$ К — температура кипения воды при давлении $P_{\text{в}} = P_0 n^{3\gamma} = 150$ атм, достигаемом при адиабатическом сжатии в $n = 3,5$ раза; $r = 1,0 \cdot 10^6$ Дж/кг — удельная теплота парообразования при $P_{\text{в}}$; $\rho_{\text{г}} = 1,24$ кг/м³ — плотность смеси $\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5 \text{O}_2$. Для пузырьков с радиусами R_1 и R_4 охлаждающихся от $T_{\text{в}} = 1000$ К до $T = 750$ и 700 К, получаем $m_{\text{ж}} = 0,7 \cdot 10^{-9}$ и $1,6 \cdot 10^{-8}$ кг соответственно.

Представленные на рис. 5,6 снимки позволяют оценить длину и радиус кумулятивной струи жидкости: $l \sim R_0$, $r_{\text{с}} \sim 0,1 R_0$. Масса жидкости, содержащейся в струе, $m_{\text{с}} = \pi r_{\text{с}}^2 l \rho_{\text{ж}} \approx 0,3 \cdot 10^{-7}$ и $5,5 \cdot 10^{-7}$ кг для пузырьков R_1 и R_4 соответственно.

Таким образом, распыление и последующее испарение в объеме пузырька массы жидкости $m_{\text{ж}} \approx (0,1 - 0,2) m_{\text{г}}$ ($m_{\text{г}}$ — масса газа в пузырьке) (2-3 % массы кумулятивной струи) способно охладить газ до температуры, при которой пузырек не воспламенится.

Отсутствие экспериментальных данных о влиянии искажения формы пузырьков на процесс кумуляции не позволяет оценить значение «неидеальности» кумуляции при сжатии и воспламенении пузырьков в ДВ.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что условия и возможность воспламенения пузырьков в ДВ в значительной степени зависят от состояния поверхности пузырьков в процессе сжатия.

Относительная роль того или иного механизма теплопотерь определяется физико-химическими свойствами среды, в частности, размером пузырьков. Так, немонотонный характер зависимости $D(d)$ (см. рис. 3,в) свидетельствует о действии конкурирующих механизмов теплопотерь.

В случае малых пузырьков, имеющих сферическую форму, превалирующую роль играют теплопотери через стенки. С ростом d влияние данного механизма уменьшается, но теплопотери пузырька при этом повышаются, так как с увеличением d усиливается искажение поверхности и, следовательно, интенсифицируется теплопередача через границу раздела газ — жидкость. Деформация формы крупных пузырьков вызывает несимметричность процесса сжатия с образованием кумулятивной струи жидкости, что также увеличивает теплопотери пузырьков.

Отклонение формы пузырьков от сферической и, следовательно, теплопотери возрастают при увеличении концентрации газовой фазы и с уменьшением вязкости жидкого компонента системы. Таким образом, наличие различных механизмов диссипации энергии пузырьков в волне детонации обуславливает существование как нижнего, так и верхнего пределов детонации по диаметру пузырьков.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 94-03-09886).

ЛИТЕРАТУРА

1. Сычев А. И. Детонационные волны в многокомпонентных пузырьковых сре-

- дах // Физика горения и взрыва. 1993. Т. 29, № 1. С. 110–117.
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 // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23, № 6. С. 76–84.
 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. Сычев А. И. Структура волны пузырьковой детонации // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30, № 4. С. 119–124.
 5. Кнэпп Р., Дэйли Дж., Хэммит Ф. Кавитация. М.: Мир, 1974.
 6. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа. 1967.
 7. Glass G. P., Kistaikowsky G. B., Michael J. V., Niki H. Mechanism of the Acetylene-Oxygen Reaction in Shock Waves // J. Chem. Phys. 1965. V. 42, N 2. P. 608–621.

*Поступила в редакцию 28/XI 1994 г.,
в окончательном варианте — 23/III 1995 г.*
