

## ОБ ИНИЦИИРОВАНИИ ПУЗЫРЬКОВОЙ ДЕТОНАЦИИ ВОЛНАМИ МАЛОЙ АМПЛИТУДЫ

© 2022 г. И. К. Гималтдинов<sup>1</sup>, С. А. Лепихин<sup>2, 3, 4, \*</sup>

<sup>1</sup>Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

<sup>2</sup>Сургутский государственный педагогический университет, Сургут, Россия

<sup>3</sup>Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

<sup>4</sup>Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

\*E-mail: sg81@bk.ru

Поступила в редакцию 26.01.2021 г.

После доработки 10.05.2021 г.

Принята к публикации 19.05.2021 г.

С помощью численного моделирования исследуется возможность инициирования детонационных волн в пузырьковых жидкостях с воспламеняющейся газовой фазой волнами давления малой амплитуды. Рассмотрены случаи предварительного снижения начального давления на границе среды перед воздействием импульса сжатия и воздействия на границу жидкости двумя последовательными волнами давления, каждая из которых по отдельности не способна инициировать детонационную волну. В первом случае проанализировано влияние параметров предварительной волны разрежения (степени снижения давления, длительности фазы разрежения), а также начальной концентрации пузырьков на минимальную амплитуду импульса сжатия, способного инициировать пузырьковую детонацию в среде. Во втором случае показана возможность инициирования детонационных волн не на границе, а внутри пузырьковой системы. Выявлено, что в зависимости от начального газосодержания среды и амплитуды воздействующих волн распространение детонационной волны от очага воспламенения может происходить как в обоих направлениях (первоначальном и обратном направлении движения инициирующей волны), так и только в первоначальном направлении.

DOI: 10.31857/S0040364422020107

### ВВЕДЕНИЕ

Пузырьковая детонация – явление возникновения и распространения детонационных волн (ДВ) в жидкости, содержащей пузырьки воспламеняющегося газа [1, 2]. Она обладает общими признаками детонационного процесса, но имеет индивидуальные особенности, выражающиеся в механизме распространения, структуре и свойствах ДВ [3]. В общем, детонация – универсальное явление, представляющее собой самоподдерживающийся процесс, который может протекать во всех химически активных средах. Инициализация и распространение детонационных волн в таких средах обусловлены высвобождением ДВ химической энергии среды, которая компенсирует энергетические затраты волны, связанные с потерями энергии в диссипативной пузырьковой среде. В большинстве работ, посвященных пузырьковой детонации, изучаются параметры, свойства и структура ДВ в зависимости от физико-химических свойств и начальных параметров пузырьковых газожидкостных сред [4–13]. Распространение ДВ в многокомпонентных пузырьковых жидкостях и в средах с неоднородным объемным распределением газовой фазы и с возможным пе-

реходом в область “чистой” жидкости рассмотрены в [14–18]. Взаимодействию ДВ друг с другом и с волнами малой амплитуды посвящены работы [9, 19]. В [9], в частности, отмечена возможность инициирования детонации в пузырьковой жидкости только волнами разрежения при их столкновении.

Возбуждение ДВ в экспериментах, как правило, производится путем воздействия на поверхность пузырьковой жидкости импульсом повышенного давления (подрывом горючей газовой смеси в камере высокого давления ударной трубы) [1–5] или “микровзрывом” проволоочки, находящейся в пузырьковой среде [6, 7]. Из экспериментов известно, что критическая амплитуда воздействия на пузырьковую среду, способная инициировать детонацию на ее границе, находится в диапазоне 15–20 атм. В теоретических работах [18, 20, 21] показана возможность инициирования детонации волнами малой амплитуды “изнутри” пузырьковой среды, например, при отражении волн давления от жестких стенок и границ разделов сред с различными физическими свойствами, а также при распространении волн в сужающихся каналах, в которых из-за формы канала происхо-

дит возрастание амплитуды волны до критических значений, вызывающих детонацию.

В данной работе рассматриваются другие способы инициирования ДВ в пузырьковой жидкости, заключающиеся в предварительном снижении начального давления на границе среды и в воздействии на границу этой жидкости серией из двух последовательных волн постоянного давления, каждая из которых не способна вызвать детонацию непосредственно на границе жидкости.

### ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Рассматривается газожидкостная система, содержащая равномерно распределенные по объему жидкости одинаковые по размеру пузырьки с горючим газом (например, смесь ацетилена с кислородом). В предположении что при распространении волновых возмущений в среде пузырьки газа не дробятся и не слипаются, для этой системы записываются уравнения волнового движения, являющиеся законами сохранения масс и концентрации пузырьков, а также уравнение сохранения импульсов с учетом относительного движения фаз [22]:

$$\begin{aligned} \frac{dp_i}{dt} + \rho_i \frac{\partial v_l}{\partial x} &= 0 \quad (i = l, g), \quad \rho_i = \rho_i^0 \alpha_i; \\ \frac{dn}{dt} + n \frac{\partial v_l}{\partial x} &= 0, \quad \rho_l^0 \frac{dv_l}{dt} + \frac{\partial p_l}{\partial x} = 0, \\ 3 \frac{dv_l}{dt} - \frac{dv_g}{dt} + \frac{3}{a} w v_{lg} + \frac{3f}{2\pi a^3 \rho_l^0} &= 0, \\ v_{lg} = v_l - v_g, \quad \alpha_l + \alpha_g = 1, \quad \alpha_g = \frac{4}{3} \pi a^3 n, \end{aligned}$$

где  $\rho_i^0$  – истинная плотность;  $v_i$  – скорость;  $\alpha_i$  – объемное содержание  $i$ -й фазы ( $i = l$  – жидкой,  $i = g$  – газообразной);  $p_l$  – давление несущей жидкости;  $a, n$  – радиус и концентрация пузырьков;  $w$  – радиальная скорость пузырьков;  $v_{lg}$  – скорость относительного движения фаз.

Сила вязкого трения задана через относительную скорость фаз:

$$f = \frac{1}{2} C_D \pi a^3 v_{lg} |v_{lg}|,$$

где  $C_D$  – коэффициент сопротивления, для которого, согласно [23], принято

$$\begin{aligned} C_D = \frac{48}{\text{Re}}, \quad 0 \leq \text{Re} < 180, \\ C_D = \frac{\text{Re}^{4/3}}{10^{3.6}}, \quad \text{Re} > 180, \end{aligned} \quad \text{Re} = \frac{2a |v_{lg}|}{v_l}$$

Здесь  $\text{Re}$  – критерий Рейнольдса,  $v_l$  – кинематическая вязкость жидкости.

Скорость радиального движения пузырьков, согласно приведенному в [24] уточнению, имеет

вид  $w = w_R + w_A$ , где первое слагаемое  $w_R$  описывается уравнением Рэлея–Ламба

$$a \frac{dw_R}{dt} + \frac{3}{2} w_R^2 - \frac{v_{lg}^2}{4} + 4v_l \frac{w_R}{a} = \frac{p_g - p_l}{\rho_l^0},$$

а второе  $w_A$  следует из решения задачи о сферической разгрузке на сфере радиуса  $a$  в несущей жидкости в акустическом приближении

$$w_A = \frac{p_g - p_l}{\rho_l^0 C_l \alpha_g^{1/3}},$$

где  $C_l$  – скорость звука в “чистой” жидкости.

Для давления в газовой фазе уравнение записывается в виде [22]

$$\frac{dp_g}{dt} = -\frac{3\gamma p_g}{a} w - \frac{3(\gamma-1)}{a} q, \quad w = \frac{da}{dt}.$$

Здесь  $\gamma$  – коэффициент Пуассона для газа,  $q$  – межфазный тепловой поток (от газа к жидкости) через единицу площади контактной поверхности.

Жидкость принимается акустически сжимаемой, газ – калорически совершенным:

$$p_l = p_0 + C_l^2 (\rho_l^0 - \rho_{l0}^0), \quad p_g = \rho_g^0 B T_g,$$

где  $B$  – газовая постоянная. Дополнительным нижним индексом 0 снабжаются параметры, характеризующие начальное невозмущенное состояние среды.

Согласно [23], интенсивность межфазного теплообмена задается в виде

$$q = \text{Nu}_l \lambda_l \frac{T_g - T_0}{2a}, \quad \frac{T_g}{T_0} = \frac{p_g}{p_0} \left( \frac{a}{a_0} \right)^3,$$

$$\text{Nu}_l = 0.65 \sqrt{\text{Pe}_l}, \quad \text{Pe}_l = \frac{2a |v_{lg}|}{k_l}, \quad k_l = \frac{\lambda_l}{\rho_l^0 c_l},$$

где  $T_0 = \text{const}$  – температура несущей жидкости;  $\text{Nu}_l$  и  $\text{Pe}_l$  – критерии Нуссельта и Пекле для фаз;  $\lambda_l, c_l$  и  $k_l$  – теплопроводность, теплоемкость и коэффициент температуропроводности фаз ( $i = l, g$ ).

В качестве газовой фазы принята ацетиленокислородная стехиометрическая смесь  $\text{C}_2\text{H}_2 + 2.5\text{O}_2$ , а в качестве жидкости – смесь глицерина с водой с объемной концентрацией глицерина 0.5. Процесс воспламенения и сгорания газа внутри пузырьков считается мгновенным. Воспламенение происходит по достижении некоторой критической температуры  $T^*$  и сопровождается повышением температуры газа на величину  $\Delta T$ , которая определяется исходя из теплотворной способности газа [25]. Данная схема воспламенения обоснована тем, что период протекания химических реакций горения газа значительно меньше характерного времени пульсации пузырьков.

Методика численного расчета представлена в [11]. В ней реализован метод сквозного счета, поз-

воляющий проводить численные расчеты без выделения границ раздела, т.е. без решения задачи о падении волны детонации на границу раздела сред.

**ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН ПРИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОМ СНИЖЕНИИ ДАВЛЕНИЯ НА ГРАНИЦЕ ПУЗЫРЬКОВОЙ ЖИДКОСТИ**

Рассмотрена ситуация, когда на границу газожидкостной среды вначале воздействует импульс, вызывающий растягивающее напряжение, а потом сразу импульс сжатия. Для параметров жидкости приняты значения:  $\rho_l^0 = 1130 \text{ кг/м}^3$ ,  $\nu_l = 6 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $c_l = 3.3 \text{ кДж}/(\text{кг К})$ ,  $\lambda_l = 0.42 \text{ Вт}/(\text{м К})$ ,  $C_l = 1700 \text{ м/с}$ ,  $T_0 = 293 \text{ К}$ ; для параметров газовой фазы:  $a_0 = 1.25 \text{ мм}$ ,  $\rho_g^0 = 1.26 \text{ кг/м}^3$ ,  $\lambda_g = 2.49 \times 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м К})$ ,  $\gamma = 1.35$ ,  $c_g = 1.14 \text{ кДж}/(\text{кг К})$ ,  $T_* = 1000 \text{ К}$ ,  $\Delta T = 3200 \text{ К}$ .

Граничное условие, определяющее внешнее воздействие на границу жидкости при  $x = 0$ , имеет вид

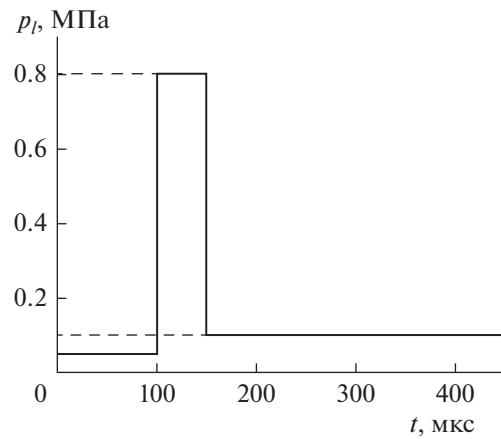
$$p_l = \begin{cases} p_0 - \Delta p_{01}, & t > t_1, \\ p_0 + \Delta p_{02}, & t_1 < t < t_2, \\ p_0, & t > t_2. \end{cases}$$

На рис. 1 показан профиль воздействующего сигнала для случая, когда на границе в течение  $\Delta t_1 = 100 \text{ мкс}$  поддерживается разрежение пузырьковой системы ( $\Delta p_{01} = 0.05 \text{ МПа}$ ), после чего происходит мгновенное увеличение амплитуды импульса давления до  $\Delta p_{02} = 0.7 \text{ МПа}$ . Фаза сжатия длится  $\Delta t_2 = 50 \text{ мкс}$ .

На рис. 2 представлены эпюры давления в жидкости, температуры газовой фазы и радиусов пузырьков, иллюстрирующие инициирование детонационной волны от сигнала, профиль которого изображен на рис. 1.

Проникновение в глубь жидкости зоны пониженного давления происходит с конечной скоростью, не превышающей скорость звука в среде. При этом в течение всей фазы разрежения происходит постепенное снижение давления во всех точках среды, до которых доходит волна разрежения. В момент времени  $t = 100 \text{ мкс}$  профиль давления в разреженной области имеет вид выпуклой вверх плавной кривой, которая по мере распространения волны разрежения удлиняется, а крутизна ее уменьшается. Постоянное снижение давления в среде в течение всей фазы разрежения приводит к первичному росту пузырьков (без перехода их в пульсационное движение), сопровождаемому уменьшением температуры в них.

Далее на границу жидкости действует импульс сжатия, под действием которого пузырьки газа коллапсируют. Из-за первоначального разрежения пузырьковой жидкости поджатие пузырьков на границе среды происходит до размеров, при

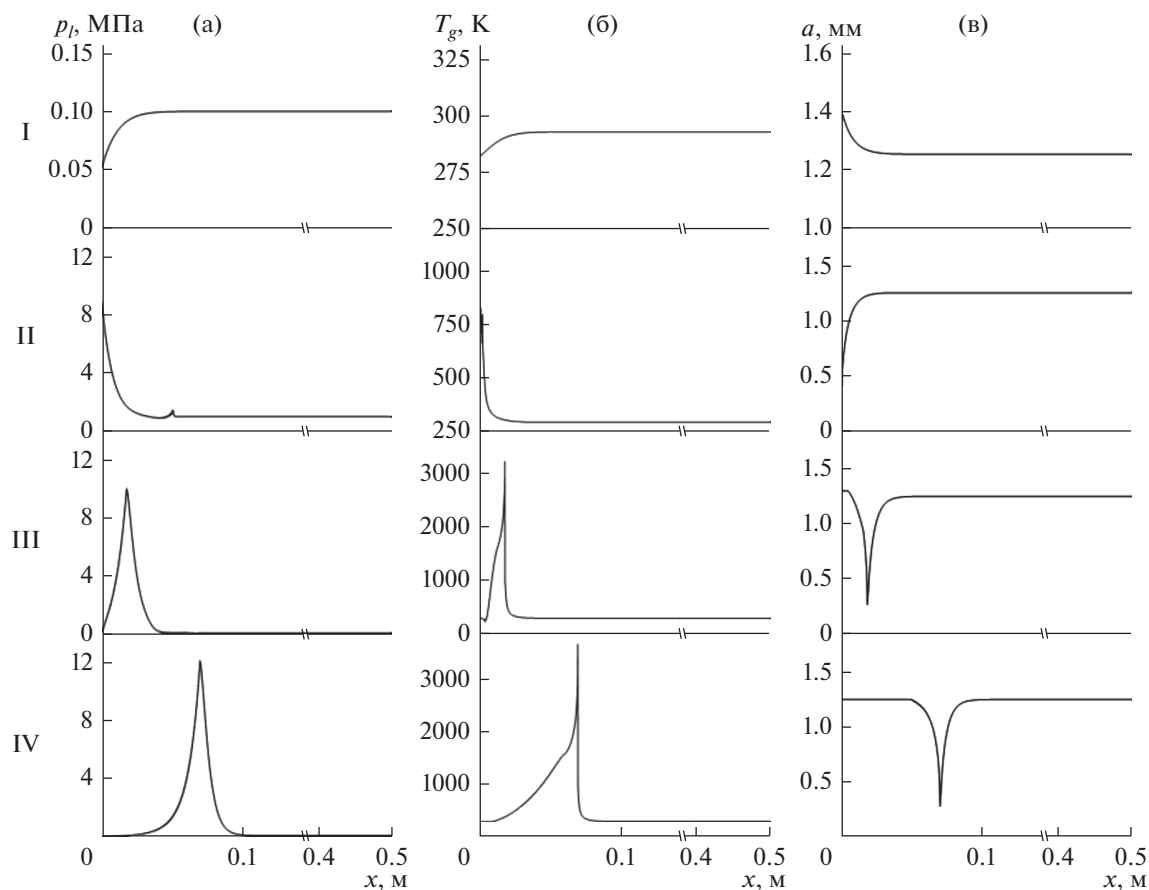


**Рис. 1.** Профиль импульса давления, действующего на границу жидкости.

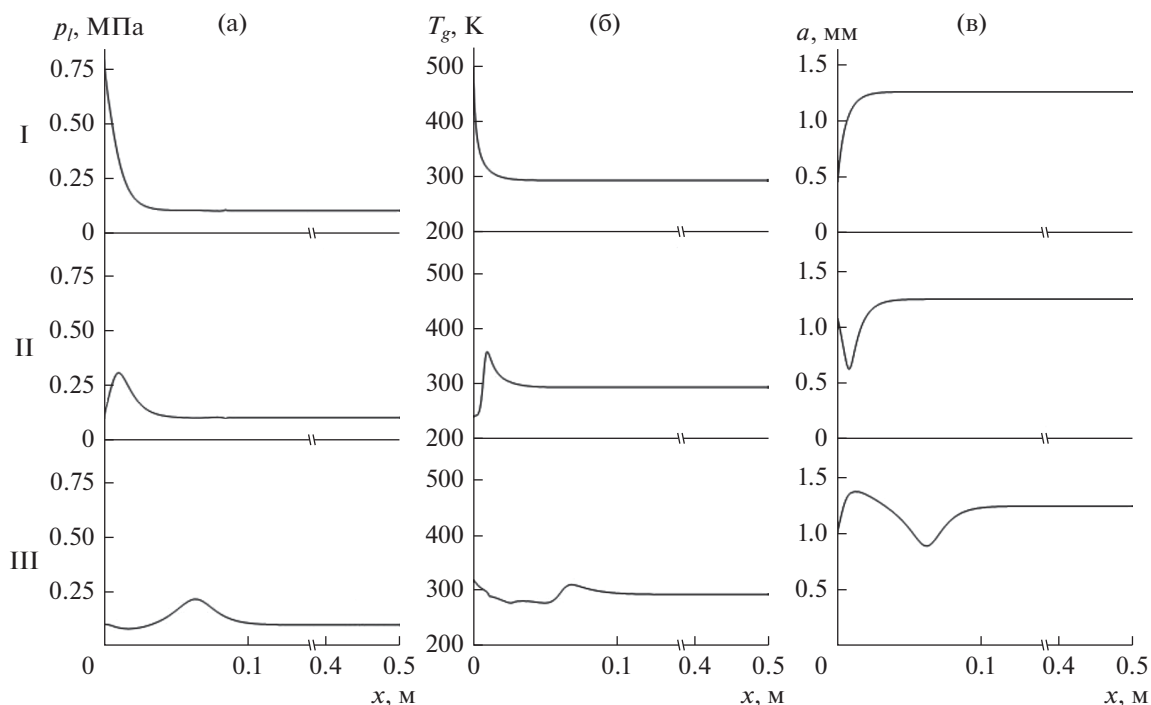
которых в них достигается температура воспламенения горючего газа ( $t = 150 \text{ мкс}$ ). В результате на границе жидкости ( $x = 0$ ) инициируется детонация и в глубь жидкости распространяется детонационная волна (моменты времени 180 и 250 мкс). Принятые в работе значения параметров газожидкостной среды, в частности объемного газосодержания, находятся в пределах установленной в [4] зоны детонации пузырьковой жидкости, в которой воспламенение газовых пузырьков в обязательном порядке инициирует детонационный процесс. Поэтому воспламенение газовой фазы в рассматриваемой модели считается необходимым и достаточным условием инициирования детонационной волны. При этом формирование детонационного солитона, т.е. достижение основными параметрами ДВ (амплитудой, скоростью, протяженностью солитона) значений, соответствующих наблюдаемым в экспериментах [1–5], происходит в процессе эволюции ДВ на расстоянии нескольких сантиметров. В частности, в момент времени 180 мкс детонационная волна еще не сформировалась, хотя взрыв горючей смеси уже произошел, а на 250 мкс детонационная волна выходит на стационарный режим, в котором параметры ДВ уже хорошо согласуются с результатами экспериментов (рис. 2).

На рис. 3 представлена ситуация, когда на границу пузырьковой жидкости действует только импульс сжатия с такими же параметрами (амплитуда  $\Delta p_0 = 0.7 \text{ МПа}$ , длительность  $\Delta t = 50 \text{ мкс}$ ), как на рис. 2. В этом случае характеристики импульса сжатия такие, что он не способен инициировать детонацию, и детонационная волна в среде не возникает, т.е. в данном случае волна в пузырьковой жидкости затухает.

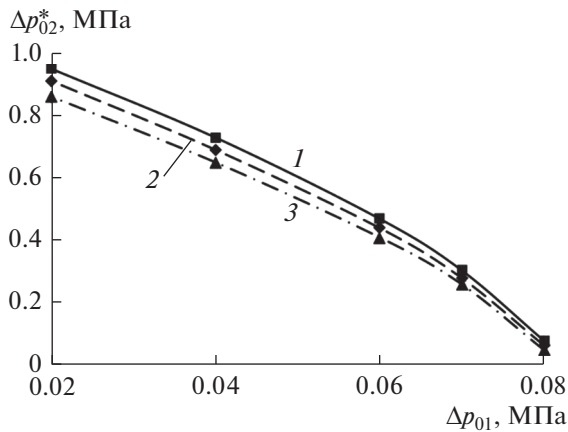
Таким образом, предварительное разрежение на границе перед действием импульса сжатия является фактором снижения критической амплитуды



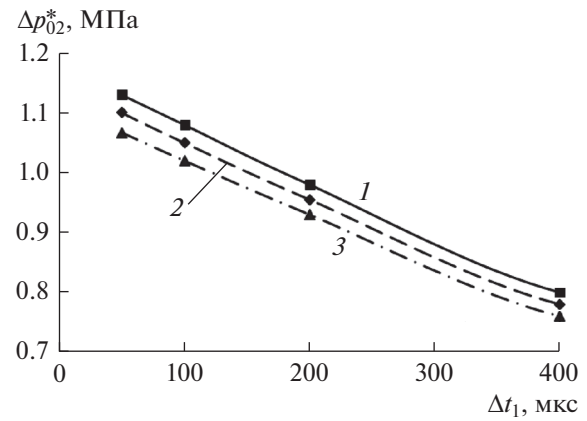
**Рис. 2.** Иницирование детонационной волны волной давления малой амплитуды после предварительного разрежения пузырьковой жидкости при параметрах пузырьковой системы:  $p_0 = 0.1$  МПа,  $\alpha_{g0} = 0.01$ : (а) – давление в жидкости, (б) – температура газовой фазы, (в) – радиусы пузырьков; I –  $t = 100$  мкс, II – 150, III – 180, IV – 250.



**Рис. 3.** Эпюры давления в жидкости (а), температуры газовой фазы (б) и радиуса пузырьков (в) при воздействии на пузырьковую жидкость только импульсом сжатия при параметрах рис. 2: I –  $t = 50$  мкс, II – 100, III – 500.



**Рис. 4.** Зависимость амплитуды фазы сжатия, способной инициировать пузырьковую детонацию, от степени предварительного снижения давления на поверхности жидкости при  $p_0 = 0.1$  МПа: 1 –  $\alpha_{g0} = 0.01$ , 2 – 0.02, 3 – 0.04.



**Рис. 5.** Зависимость критической амплитуды  $\Delta p_{02}^*$  от времени фазы предварительного разрежения жидкости; параметры пузырьковой системы – как на рис. 2; 1–3 – см. рис. 4.

импульса сжатия способного инициировать пузырьковую детонацию. Снижение амплитуды инициирующего детонацию импульса сжатия связано с тем, что в фазе разрежения происходит увеличение радиусов пузырьков. Как следует из [27], если предварительно расширить пузырек, увеличив его размеры, то на стадии сжатия он сжимается сильнее. Эти эффекты наблюдаются на рис. 2 и 3.

На рис. 4 показана зависимость критической амплитуды фазы сжатия  $\Delta p_{02}^*$  от амплитуды фазы разрежения  $\Delta p_{01}$  при различных значениях начальной объемной концентрации пузырьков  $\alpha_{g0}$ . Длительность фазы разрежения составляет  $\Delta t_1 = 100$  мкс, фазы сжатия  $\Delta t_2 = 50$  мкс. С увеличением степени предварительного разрежения жидкости критическая амплитуда фазы сжатия уменьшается практически линейным образом. Это обусловлено ростом газовых пузырьков в период фазы разрежения, вследствие чего для поджатия пузырьков до критических размеров, при которых в газовой фазе достигается температура воспламенения, требуется меньшая амплитуда (энергия) фазы сжатия. При существенном снижении давления в пузырьковой жидкости ( $\Delta p_{01} \geq 0.8 p_0$ ) инициализация детонации возможна последующими импульсами сжатия малой амплитуды, соизмеримой с начальным давлением системы ( $\Delta p_{02}^* \cong p_0$ ).

Линии на рис. 4 расположены близко друг к другу, что свидетельствует о слабой зависимости критической амплитуды фазы сжатия  $\Delta p_{02}^*$  от начального объемного газосодержания пузырьковой жидкости.

Также исследовано влияние на критическую амплитуду фазы сжатия, которая способна инициировать детонационную волну в среде, време-

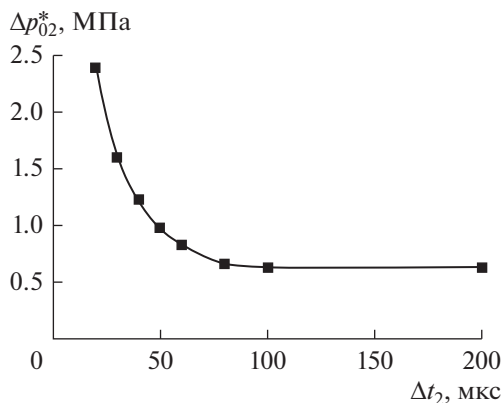
ни  $\Delta t_{01}$ , в течение которого на границе жидкости выдерживается пониженное давление.

На рис. 5 показана зависимость  $\Delta p_{02}^*(\Delta t_1)$  при амплитуде фазы разрежения  $\Delta p_{01} = 0.05$  МПа и времени действия фазы сжатия  $\Delta t_2 = 50$  мкс. Видно, что с увеличением длительности фазы разрежения  $\Delta t_{01}$  с 50 до 400 мкс критическая амплитуда фазы сжатия линейно уменьшается. Однако, как показывает расчет, снижение критической амплитуды  $\Delta p_{02}^*$  с увеличением длительности фазы разрежения наблюдается до некоторого критического значения  $\Delta t_1^*$  (в условиях численного эксперимента  $\Delta t_1^* \approx 600$  мкс), где  $\Delta p_{02}^*$  достигает своего минимального значения.

Таким образом, критическая (т.е. минимальная) амплитуда фазы сжатия  $\Delta p_{02}^*$ , способная инициировать ДВ в пузырьковой жидкости, значительно зависит от времени существования  $\Delta t_1$  и амплитуды  $\Delta p_{01}$  фазы предварительного разрежения и практически не зависит от начального объемного газосодержания.

Также проанализировано влияние на критическую амплитуду  $\Delta p_{02}^*$  длительности фазы сжатия  $\Delta t_2$ . Как видно из рис. 6, с увеличением длительности фазы сжатия с 20 до 100 мкс амплитуда  $\Delta p_{02}^*$ , вызывающая детонацию в пузырьковой жидкости, нелинейно уменьшается, достигая своего минимального значения, и после этого не изменяется.

Так как  $\Delta p_{02}^*$  практически не зависит от начальной концентрации газовой фазы, то на рис. 6 представлена только одна кривая при  $\alpha_{g0} = 0.01$ .



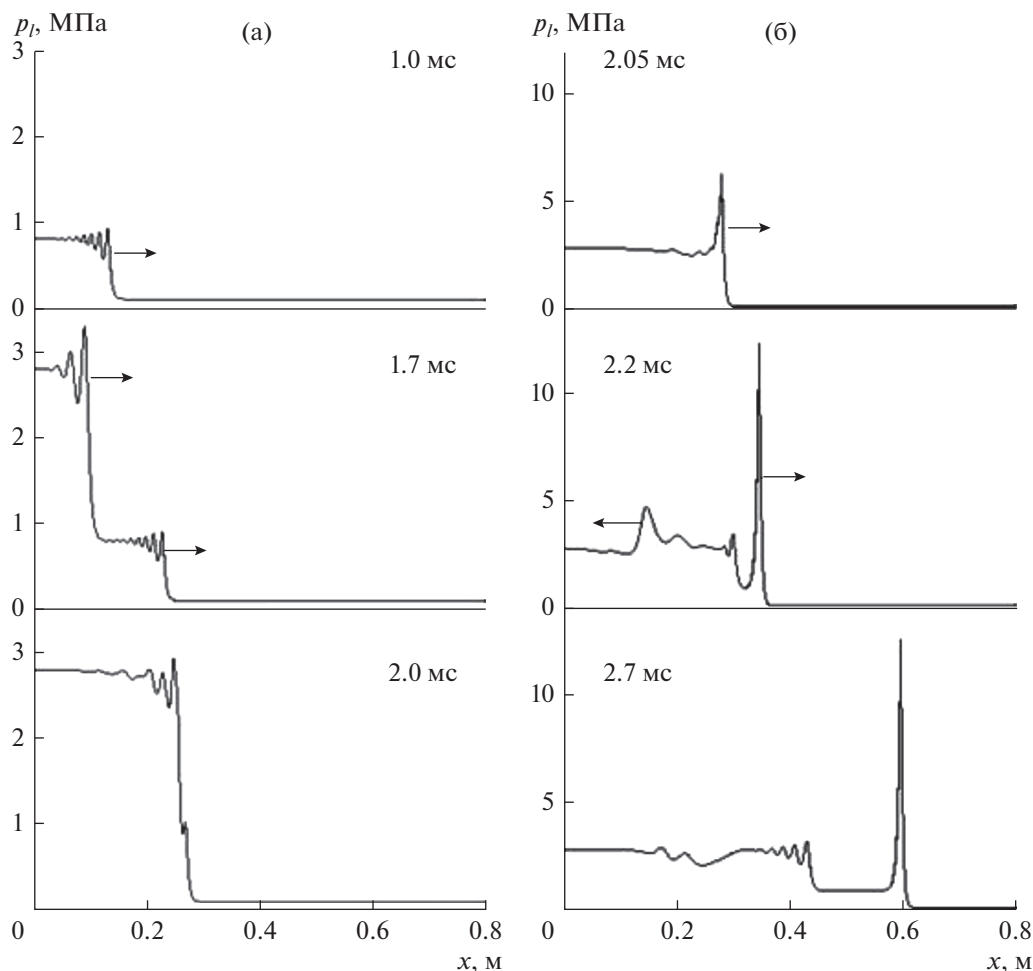
**Рис. 6.** Зависимость критической амплитуды  $\Delta p_{02}^*$  от времени фазы сжатия при  $p_0 = 0.1$  МПа,  $\alpha_{g0} = 0.01$ ; параметры сигнала: “амплитуда” фазы разрежения  $\Delta p_{01} = 0.5$  МПа, время фазы разрежения  $\Delta t_2 = 200$  мкс.

### ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН ДВУМЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМИ ВОЛНАМИ ДАВЛЕНИЯ

Рассматривается ситуация, когда на границу пузырьковой системы ( $x = 0$ ) последовательно через некоторый временной интервал действуют две волны давления типа “ступенька”. При этом амплитуда каждого импульса сжатия не способна инициировать пузырьковую детонацию на границе среды. Граничное условие для такого случая имеет вид

$$p_l = \begin{cases} p_0 + \Delta p_{01}, & 0 < t < t_*, \\ p_0 + \Delta p_{02}, & t > t_*. \end{cases}$$

На рис. 7 показана эволюция таких волн при  $\Delta p_{01} = 0.7$  МПа,  $\Delta p_{02} = 2.7$  МПа,  $t_* = 1.5$  мс. Начальные параметры пузырьковой жидкости:  $p_0 = 0.1$  МПа,  $\alpha_{g0} = 0.04$ . Остальные параметры среды такие же, как на рис. 2. В момент времени  $t = 1.0$  мс в жидкости распространяется только первая вол-



**Рис. 7.** Эволюция волн в жидкости и инициирование детонационной волны; на графиках указаны моменты времени; амплитуды волн:  $\Delta p_{01} = 0.7$  МПа,  $\Delta p_{02} = 2.7$  МПа,  $\alpha_{g0} = 0.04$ .

на давления. Ее амплитуда такова, что детонация в системе не возникает, а сама волна распространяется как волна давления в “неактивной” пузырьковой жидкости, например в водовоздушной смеси. Эта волна имеет осцилляционную структуру, связанную с радиальной инерцией пузырьковой жидкости. При  $t = 1.5$  мс вслед за первой волной начинает распространяться вторая волна давления. Амплитуда второй волны (относительно начального давления среды) такова, что при отсутствии первой волны вторая волна могла бы инициировать детонационную волну в пузырьковой среде. Так как вторая волна распространяется в области поджатой пузырьковой жидкости с более высоким начальным давлением, то ее амплитуда оказывается недостаточной для инициирования детонации в пузырьковой жидкости ( $t = 1.7$  мс). Обладая более высокой амплитудой и, следовательно, скоростью, она достаточно быстро догоняет первую волну. При этом значения скоростей как первой, так и второй волны хорошо согласуются с величинами, приведенными для подобных ситуаций в [9, 20]. В момент времени 2.0 мс вторая волна практически достигает фронта первой волны. В следующий момент вторая волна опережает первую и распространяется в области пузырьковой жидкости с первоначальным давлением. Так как при этом амплитуда волны достаточна для инициирования детонации в среде (1.5–2.0 МПа), то в сжимающихся под воздействием этой волны пузырьках достигается температура воспламенения газа – в жидкости возникает очаг детонации, волна давления инициирует детонационную волну ( $t = 2.05$  мс), которая продолжает эволюционировать в невозмущенной среде. В обратном направлении от очага распространяется волна давления с амплитудой, в 1.5–2 раза превышающей амплитуду  $\Delta p_{02}$  ( $t = 2.2$  мс).

На рис. 8 показано инициирование детонационной волны при начальном газосодержании в пузырьковой жидкости  $\alpha_{g0} = 0.06$  и амплитуде второй волны  $\Delta p_{02} = 1.7$  МПа. Остальные параметры газожидкостной системы и волн давления такие же, как на рис. 7.

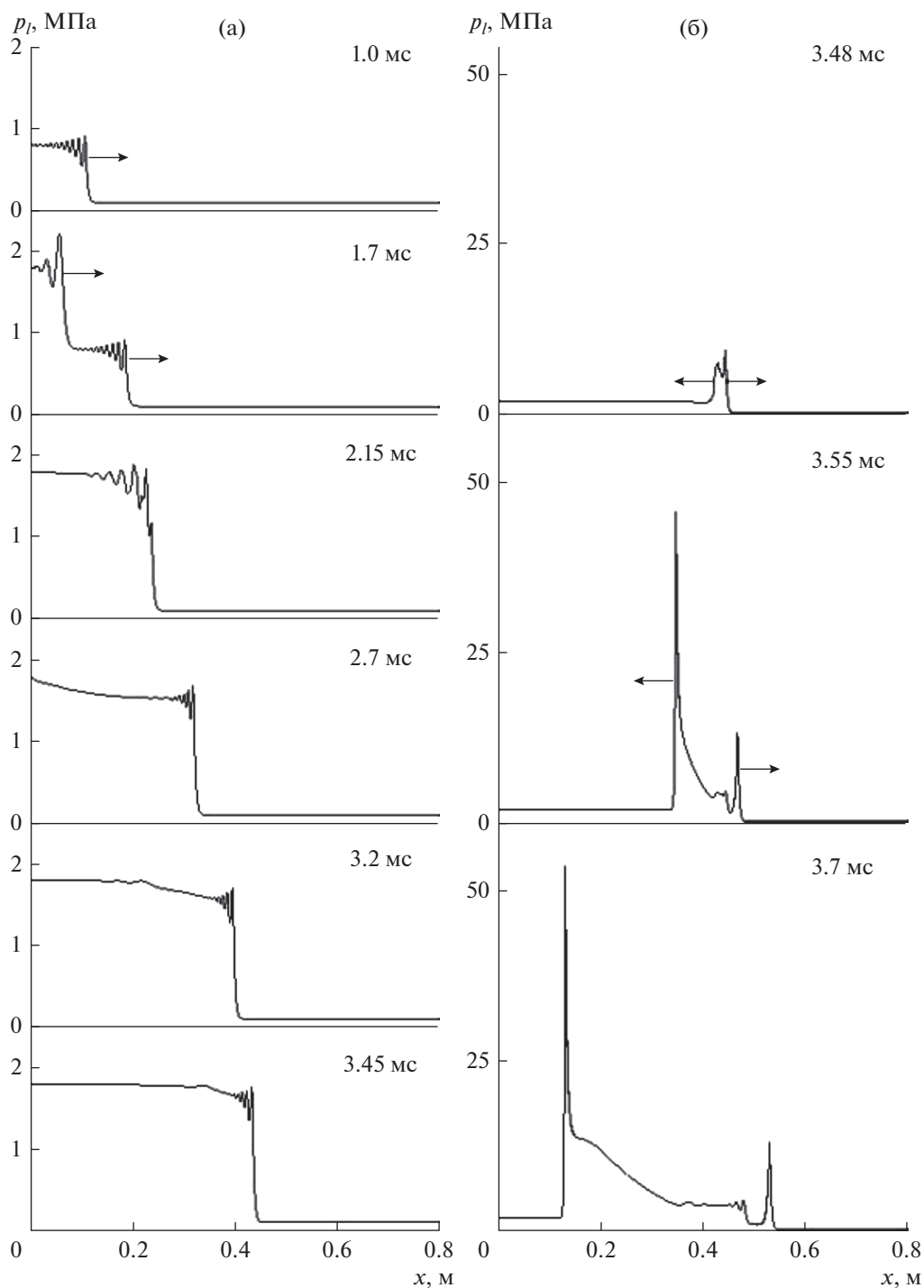
На начальном этапе распространение волн происходит аналогично случаю, представленному на рис. 7. При этом волны обладают меньшими скоростями из-за большей концентрации газовой фазы [9, 22]. Скорость у первой волны, распространяющейся в невозмущенной среде с первоначальным давлением  $p_0$ , меньше, чем у второй волны, распространяющейся по поджатой пузырьковой жидкости, аналогично ситуации на рис. 7. Как следствие, вторая волна догоняет первую к моменту  $t = 2.15$  мс. После проникновения второй волны в область жидкости с исходным первоначальным состоянием и восстановления давления за фронтом волны в среде возникает очаг детона-

ции. При этом излучаемая в очаге энергия оказывается достаточной для инициирования ДВ и в поджатой части пузырьковой жидкости. Распространение ДВ от очага воспламенения происходит в обоих направлениях ( $t = 3.48$  мс). Причем амплитуда детонационной волны, эволюционирующей в поджатой части жидкости, может в несколько раз превосходить амплитуду ДВ в области среды с первоначальным состоянием ( $t = 3.55$  и  $3.7$  мс). В реальности более высокая амплитуда “обратной” ДВ может быть обусловлена как большим давлением в возмущенной части среды, так и уменьшением размеров пузырьков из-за их дробления на фронте инициирующей волны давления. В свою очередь дробление пузырьков, происходящее на фронте падающей волны, может быть фактором, ограничивающим возможность развития “обратной детонации” в пузырьковой жидкости. Представленный случай “двусторонней детонации” является теоретическим решением, допускаемым предложенной в работе математической моделью. Данный случай может представлять интерес для анализа возможных режимов протекания детонации в пузырьковых системах.

Как показывают расчеты, возникновение “двусторонней” детонации в пузырьковой жидкости возможно только при высокой концентрации газовой фазы ( $\alpha_{g0} > 0.05$ ), определяющей высокую сжимаемость пузырьковой жидкости. При этом достижение условий детонации зависит от амплитуды исходных волн и начального состояния системы. В дальнейшем гипотеза о “двухсторонней детонации” может быть скорректирована проведением соответствующих экспериментов.

На рис. 9 приведена картина, иллюстрирующая возможные режимы детонации в пузырьковой жидкости в случае инициирования двумя последовательными волнами давления типа “ступенька” при разных значениях начальной концентрации газовой фазы. По вертикальной оси отложена суммарная амплитуда волн  $\Delta P_0 = \Delta p_{01} + \Delta p_{02}$ , где  $\Delta p_{01} = \text{const}$ . Проанализирован случай  $\Delta p_{01} = 0.7$  МПа. Параметры газожидкостной системы такие же, как на рис. 7.

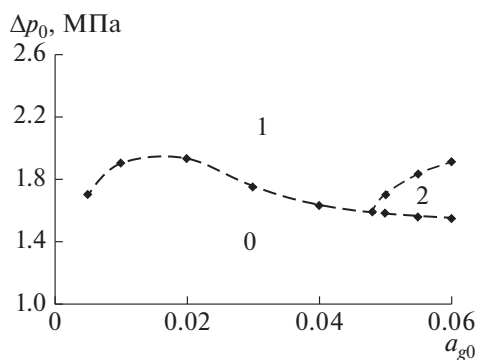
На рис. 9 показаны три области, каждая из которых характеризуется определенным типом развития пузырьковой детонации или ее отсутствием. В нижней области, обозначенной цифрой 0, ДВ не возникает. Максимальная суммарная амплитуда волн здесь ниже критической амплитуды детонации ( $\Delta P_0 < \Delta P_0^*$ ), вследствие чего температура воспламенения в поджатых волной пузырьках не достигается. Небольшая область справа, расположенная между штриховыми линиями, при  $\alpha_{g0} \geq 0.05$  и обозначенная цифрой 2, соответствует условиям возбуждения “двусторонней” детонационной волны в системе. В данном случае амплитуда давления в очаге взрыва является доста-



**Рис. 8.** Эволюция волн в жидкости и инициирование детонационной волны; на графиках указаны моменты времени; амплитуды волн:  $\Delta p_{01} = 0.7$  МПа,  $\Delta p_{02} = 1.7$  МПа,  $\alpha_{g0} = 0.06$ .

точной для инициирования детонационного процесса не только в области пузырьковой жидкости с первоначальным давлением, но и в поджатой части среды с высоким давлением. Область 2 ограничена снизу зоной отсутствия детонации в пузырьковой жидкости, а сверху областью 1, которая определяет условия возникновения “одно-

сторонней” ДВ, характеризующейся распространением детонационного процесса только в первоначальном направлении в область неподжатой пузырьковой жидкости. Существование зоны с “двусторонней” волной детонации определяется высокой сжимаемостью пузырьковой жидкости при больших значениях начальной концен-



**Рис. 9.** Режимы детонации в пузырьковой жидкости при воздействии последовательными волнами давления при  $p_0 = 0.1$  МПа, амплитуде первой волны  $\Delta p_{01} = 0.7$  МПа.

трации газовой фазы. Возникает зона при суммарной амплитуде волн равной или незначительно превосходящей критическую амплитуду детонации для области жидкости в первоначальном состоянии ( $\Delta P_0 \geq \Delta P_0^*$ ). Если суммарная амплитуда волн при проникновении второй волны во фронт первой волны в область невозмущенной жидкости оказывается заметно выше критической амплитуды инициирования детонации в этой части жидкости ( $\Delta P_0 \geq \Delta P_0^*$ ), то ДВ в обратном направлении не возникает из-за сильной поджатости среды изначальными волнами, т.е. ДВ эволюционирует только в первоначальном направлении.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе на основе численного эксперимента исследована возможность возбуждения детонационных волн в химически активной пузырьковой жидкости волнами малой амплитуды, которые при обычных условиях не способны инициировать пузырьковую детонацию.

Показано, что одним из таких способов может быть предварительное снижение давления на границе жидкости с последующим воздействием на среду волной сжатия. В данном случае амплитуда воздействующего импульса давления, способного инициировать детонационную волну в пузырьковой системе, может быть в несколько раз меньше критической амплитуды, обеспечивающей пузырьковую детонацию в “обычных” условиях.

Выявлено, что минимальная амплитуда волны сжатия, вызывающая детонационную волну в предварительно разреженной жидкости, существенным образом зависит от параметров воздействующего сигнала: степени снижения давления и длительности фаз разрежения и сжатия. В частности, показано, что при предварительном снижении начального давления на границе пузырьковой жидко-

сти импульсом разрежения, амплитуда которого составляет 0.8 от начального давления, инициализация пузырьковой детонации в системе возможна волной сжатия малой амплитуды, которая может не превышать начального давления среды.

Другим способом возбуждения детонации в пузырьковой жидкости с воспламеняющимся газом является воздействие на ее границу двумя последовательными волнами сжатия, каждая из которых не способна вызвать детонацию на поверхности жидкости. Если вторая волна обладает большей амплитудой, чем первая, то, распространяясь с большей скоростью, она догоняет первую волну и, проникая через ее фронт, может инициировать детонационную волну в области невозмущенной жидкости. В таком случае детонационный процесс развивается не от поверхности, а изнутри пузырьковой системы.

Выявлено, что в зависимости от начального объемного газосодержания пузырьковой жидкости и амплитуды исходных волн эволюция детонационной волны в системе может происходить в обе стороны от очага воспламенения или только в направлении первоначального распространения волн. В частном случае построена картина, иллюстрирующая условия, при которых формируется тот или иной вид детонационной волны.

Работа выполнена в рамках госзадания в сфере научной деятельности № FEUR-2020-0004 (наименование проекта “Решение актуальных задач и исследование процессов в нефтехимических производствах, сопровождающихся течениями многофазных сред”).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сычев А.И. Волна детонации в системе жидкость—пузырьки газа // ФГВ. 1985. Т. 21. № 3. С. 103.
2. Сычев А.И., Пинаев А.В. Самоподдерживающаяся детонация в жидкостях с пузырьками взрывчатого газа // ПМТФ. 1986. № 1. С. 133.
3. Пинаев А.В., Сычев А.И. Структура и свойства детонации в системах жидкость—пузырьки газа // ФГВ. 1986. Т. 22. № 3. С. 109.
4. Пинаев А.В., Сычев А.И. Влияние физико-химических свойств газа и жидкости на параметры и условия возникновения детонационных волн в системах жидкость—пузырьки газа // ФГВ. 1987. Т. 23. № 6. С. 76.
5. Сычев А.И. Влияние размера пузырьков на характеристики волн детонации // ФГВ. 1995. Т. 31. № 5. С. 83.
6. 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.
7. Кочетков И.И., Пинаев А.В. Ударно-волновые процессы при взрыве проводников в воде и пузырьковых средах // ФГВ. 2015. Т. 51. № 6. С. 109.
8. Ждан С.А. О стационарной детонации в пузырьковой среде // ФГВ. 2002. Т. 38. № 3. С. 85.

9. *Кедринский В.К.* Гидродинамика взрыва: эксперимент и модели. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 435 с.
10. *Сычев А.И.* Влияние начального давления пузырьковых сред на характеристики волн детонации // ЖТФ. 2015. Т. 85. № 4. С. 126.
11. *Гималтдинов И.К., Лепихин С.А.* Особенности влияния скольжения фаз и начального давления на динамику детонационных волн в пузырьковой жидкости // ТВТ. 2019. Т. 57. № 3. С. 459.
12. *Сычев А.И.* Управляемая пузырьковая детонация // ТВТ. 2019. Т. 57. № 2. С. 291.
13. *Tukhvatullina R.R., Frolov S.M.* Numerical Simulation of Shock and Detonation Waves in Bubbly Liquids // Shock Waves. 2020. V. 30. Iss. 3. P. 263.
14. *Сычев А.И.* Ударные волны в многокомпонентных средах “жидкость–пузырьки газа–капли жидкости” // ТВТ. 2011. Т. 49. № 3. С. 409.
15. *Ляпидевский В.Ю.* Структура детонационных волн в многокомпонентных пузырьковых средах // ФГВ. 1997. Т. 33. № 3. С. 104.
16. *Гималтдинов И.К., Кучер А.М.* Детонационные волны в многокомпонентной пузырьковой жидкости // ТВТ. 2014. Т. 52. № 3. С. 423.
17. *Гималтдинов И.К., Арсланбекова Р.Р., Левина Т.М.* Особенности динамики постдетонационных волн // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23. № 3. С. 371.
18. *Гималтдинов И.К., Левина Т.М.* Особенности динамики детонационных волн в пузырьковой жидкости при прохождении границы “водоглицериновый раствор – масло” // Изв. ТПУ. Инжиниринг ресурсов. 2017. Т. 328. № 8. С. 55.
19. *Сычев А.И.* Столкновение детонационных волн в пузырьковых средах // ЖТФ. 2019. Т. 89. № 2. С. 179.
20. *Лепихин С.А., Галимзянов М.Н., Гималтдинов И.К.* Иницирование детонационных волн в каналах переменного сечения, заполненных жидкостью с пузырьками горючего газа // ТВТ. 2010. Т. 48. № 2. С. 234.
21. *Топольников А.С., Гималтдинов И.К.* Динамика детонационных волн в каналах переменного сечения, заполненных пузырьковой жидкостью // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21. № 4. С. 509.
22. *Нигматулин Р.И.* Динамика многофазных сред. Т. 1. М.: Наука, 1987. 464 с.
23. *Шагапов В.Ш., Абдрашитов Д.В.* Структура волн детонации в пузырьковой жидкости // ФГВ. 1992. Т. 28. № 6. С. 89.
24. *Нигматулин Р.И., Шагапов В.Ш., Вахитова Н.К.* Проявление сжимаемости несущей фазы при распространении волн в пузырьковой среде // ДАН СССР. 1989. Т. 304. № 5. С. 1077.
25. *Шагапов В.Ш., Вахитова Н.К.* Волны в пузырьковой системе при наличии химических реакций в газовой фазе // ФГВ. 1989. Т. 25. № 6. С. 14.
26. *Самарский А.А., Попов Ю.П.* Разностные схемы газовой динамики. М.: Наука, 1973. 496 с.
27. *Аганин А.А., Ильгамов М.А.* Динамика газового пузырька при возбуждении импульсами сжатия и разрежения в жидкости // Докл. РАН. 2002. Т. 382. № 2. С. 176.