

УДК 532.329; 532.2.532

ИНИЦИИРОВАНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В ТРУБЕ С НЕОДНОРОДНЫМ ПО СЕЧЕНИЮ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ПУЗЫРЬКОВ

Гималтдинов Ильяс Кадирович¹,

iljas_g@mail.ru

Баязитова Алина Разифовна²,

stlina@mail.ru

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

² Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета,
Россия, 453103, г. Стерлитамак, пр. Ленина, 49.

Актуальность. Распространение детонационной волны в пузырьковой жидкости – уникальное явление, потому что пузырьковая детонация инициируется и распространяется в системах с очень малым энергосодержанием, но при этом обладает общими для всех детонационных волн признаками (самоподдерживающийся стационарный процесс). Так как пузырьковые среды структурно отличаются от химически активных гомогенных сред (жидких, газообразных, твердых взрывчатых веществ) и гетерогенных (газ-частицы, пена и т. д.), то детонация в пузырьковых средах обладает рядом особенностей, связанных со спецификой пузырьковой среды. Пузырьковые жидкости являются рабочей средой в различных отраслях промышленности, связанных с нефтепереработкой, металлургией и т. д. В одних случаях пузырьковые жидкости являются рабочей средой для ведения технологических процессов (например, жидкофазное окисление различных газов), в других – элементом системы обеспечения взрывобезопасности (предохранительные жидкостные затворы), поэтому необходима разработка научных принципов выбора взрывобезопасных режимов технологических процессов, протекающих в газожидкостных средах, и эксплуатации жидкостных предохранительных затворов.

Цель: изучение особенностей инициирования и распространения детонации в пузырьковой жидкости при неоднородном распределении по сечению трубы взрывчатых пузырьков.

Объект: пузырьковые жидкости, содержащие взрывчатый газ внутри пузырьков.

Методика исследования основывается на решении системы дифференциальных уравнений в частных производных.

Результаты исследования показали, что неоднородное распределение взрывчатых пузырьков по сечению трубы приводит к существенному снижению амплитуды первоначальной волны, способной инициировать детонацию. Кроме того, установлено, что при распространении детонационной волны из-за поджатия остаются участки, где детонация не происходит.

Ключевые слова:

Двумерность, детонация, волна, пузырьки, жидкость, газ.

Введение

Детонация – самоподдерживающийся (автоволновой) процесс, существующий в химически активных средах. Возможность существования детонационного процесса обеспечивается энерговыделением в среде, компенсирующим энергозатраты детонации на необратимое преобразование среды. Детонационная волна в пузырьковой жидкости – это комплекс, состоящий из ударной волны, распространяющейся с определенной скоростью, и зоны химических реакции за ней. Волна пузырьковой детонации существует в химически активных средах, например, газожидкостная смесь с взрывчатым газом внутри пузырьков.

Интерес исследователей к изучению волн пузырьковой жидкости не уменьшается, что связано с некоторыми парадоксальными явлениями при распространении волн в таких системах [1–8]. В настоящее время наряду с исследованием одномерных волн в пузырьковых жидкостях активно изучаются двумерные волны. В [9] изучена эволюция нелинейных волн давления в трубе при разных законах распределения пузырьков по сечению. В [10–14] исследована динамика детонационных

волн в трубе, содержащей пузырьковые кластеры различной геометрии.

Из экспериментов и математических моделей по пузырьковой детонации известно, что для инициирования детонации необходимо воздействовать на пузырьковую жидкость импульсом давления амплитудой около 2,0 МПа. Это справедливо в случае, когда пузырьки расположены в объеме жидкости равномерно. Но, как показывают расчеты для ацетилено-кислородной стехиометрической смеси $C_2H_2 + 2,5O_2$, приведенные в [11], когда взрывчатые пузырьки расположены в объеме в виде пузырьковой завесы конечных размеров, воздействие давлением амплитудой 4–5 атмосфер на границу жидкости из-за фокусировки волны в области пузырьковой завесы приводит к инициированию детонации. Таким образом, распределение пузырьков в объеме жидкости в виде пузырьковой завесы приводит к значительному уменьшению диапазона амплитуд первоначальной волны, способного инициировать детонацию.

В данной работе исследованы особенности инициирования и распространения детонации в пузырьковой жидкости при неоднородном распреде-

лении взрывчатых пузырьков по сечению трубы. Показано, что неоднородность объемного содержания пузырьков может привести к существенному снижению амплитуды первоначальной волны, способной иницировать детонацию.

Постановка задачи

Исследуем волны давления в трубе, заполненной пузырьковой жидкостью, при неравномерном распределении объемного содержания взрывчатого газа вдоль радиальной координаты. Рассмотрим два случая: когда объемное содержание газа монотонно увеличивается к центру трубы по линейному закону, и, наоборот, когда объемное содержание пузырьков увеличивается от центра трубы к периферии.

Будем полагать, что температура газа внутри пузырьков при достижении некоторого значения T_* мгновенно изменяется на величину ΔT , соответствующую теплотворной способности газа, вследствие чего давление в газе и жидкости повышается.

Для описания волнового движения запишем систему, состоящую из уравнений масс, числа пузырьков, импульсов и давления в пузырьках [10, 15]

$$\frac{d\rho_i}{dt} + \rho_i \frac{v_r}{r} + \rho_i \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = 0, (i = l, g),$$

$$\frac{dn}{dt} + n \frac{v_r}{r} + n \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = 0,$$

$$\rho_l^0 \frac{dv_r}{dt} + \frac{\partial p_l}{\partial r} = 0, \quad \rho_l^0 \frac{dv_z}{dt} + \frac{\partial p_l}{\partial z} = 0,$$

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

$$w = \frac{da}{dt}, \quad \left(\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v_r \frac{\partial}{\partial r} + v_z \frac{\partial}{\partial z} \right),$$

$$\alpha_l + \alpha_g = 1, \quad \alpha_g = 4/3\pi n a^3, \quad \rho_l = \rho_l^0 \alpha_l, \quad \rho = \rho_g + \rho_l.$$

Все обозначения такие же, как в [10].

При описании радиального движения учитывается акустическое излучение от пузырьков, поэтому будем полагать, что $w = w_A + w_R$ [16]:

$$a \frac{dw_R}{dt} + \frac{3}{2} w_R^2 + 4\nu_l \frac{w_R}{a} = \frac{p_g - p_l}{\rho_l^0}, \quad w_A = \frac{p_g - p_l}{\rho_l^0 C_l \alpha_g^{1/3}},$$

где ν_l – вязкость жидкости; C_l – скорость звука в «чистой» жидкости.

Для описания жидкости и газа примем следующие уравнения

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

где B – газовая постоянная. Индекс 0 внизу относится к начальному состоянию.

Тепловой поток q_g задается приближенным конечным соотношением [15]

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

$$\text{Nu}_g = \begin{cases} \sqrt{\text{Pe}_g}, & \text{Pe}_g \geq 1004; \\ 10, & \text{Pe}_g < 100, \end{cases}$$

$$\text{Pe}_g = 12(\gamma-1) \frac{T_0}{|T_g - T_0|} \frac{a |w|}{\kappa_g}, \quad k_g = \frac{\lambda_g}{c_g \rho_g}.$$

Здесь $T_0 = \text{const}$ – температура жидкости; Nu и Pe – числа Нуссельта и Пекле; k_g и λ_g – коэффициенты температуропроводности и теплопроводности газов; c_g – теплоемкость газа.

В качестве газовой фазы для расчетов принимается ацетилено-кислородная стехиометрическая смесь $\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2$ [1], значения T_* и ΔT получены в [11] с учетом [17].

Результаты расчетов

Исследуем динамику детонационных волн в неоднородной по объемному содержанию взрывчатого газа пузырьковой жидкости. Методика численного расчета представлена в [11, 18].

Для того, чтобы выделить область, где произошла химическая реакция в газовой фазе, при численных расчетах был введен индикатор, который в дальнейшем будем называть индикатором детонации.

На рис. 1 представлен случай иницирования волн детонации при неоднородном распределении взрывчатых пузырьков по сечению трубы, когда объемное содержание пузырьков увеличивается от стенки к оси трубы линейно от $\alpha_{g0}^w = 0,001$ до $\alpha_{g0}^c = 0,07$ по закону $\alpha_{g0} = \left(\frac{\alpha_{g0}^w - \alpha_{g0}^c}{R_w - 1} \right) r + \alpha_{g0}^c$.

Остальные начальные условия при этом записываются в следующем виде: ($t=0$), $z>0$:

$$p_l = p_0, \quad v_r = v_z = 0, \quad \rho_l = \rho_{l0}^0,$$

$$\rho = \rho_{l0}^0 (1 - \alpha_{g0}), \quad p_g = p_0, \quad a = a_0, \quad w = 0.$$

На оси симметрии ($r_0=0$) и стенке трубы ($r_0=R_c$) принимаются условия равенства нулю нормальной компоненты скорости $v_r=0$.

Возмущение давления иницируется скачком давления на границе $z_0=0$, $0 \leq r_0 \leq R_c$, которое задается следующим выражением: $p_{l0} = p_0 + \Delta p_0$, $t > 0$.

Поля давления (а), (б), (е) и (ф) и поля для индикатора детонации (с), (д), (г) и (h) (рис. 1) соответствуют моментам времени $t=0,7; 0,8; 1,0$ и $1,1$ мс. Отметим, что черный цвет в поле для индикатора детонации соответствует зоне, где химическая реакция в газовой фазе уже произошла. Как видно из картинок (а) и (с), к моменту 0,7 мс происходит фокусировка волн давления к центру трубы из-за более сильной сжимаемости этой области, что обусловлено более высоким объемным содержанием пузырьков в центре трубы. Амплитуда волны достигает значения $\sim 1,6$ МПа, но этого недостаточно для иницирования детонации, т. е. температура в пузырьках не достигает критического значения T_* и детонации к этому моменту времени не происходит. Из картинок (б) и (д) видно, что к моменту 0,8 мс иницируется детонационная волна, которая распространяется вдоль оси трубы с амплитудой $\sim 4,5$ МПа. Из картинок (е) и (г), соответствующих моменту 1,0 мс, видно, что детонационная

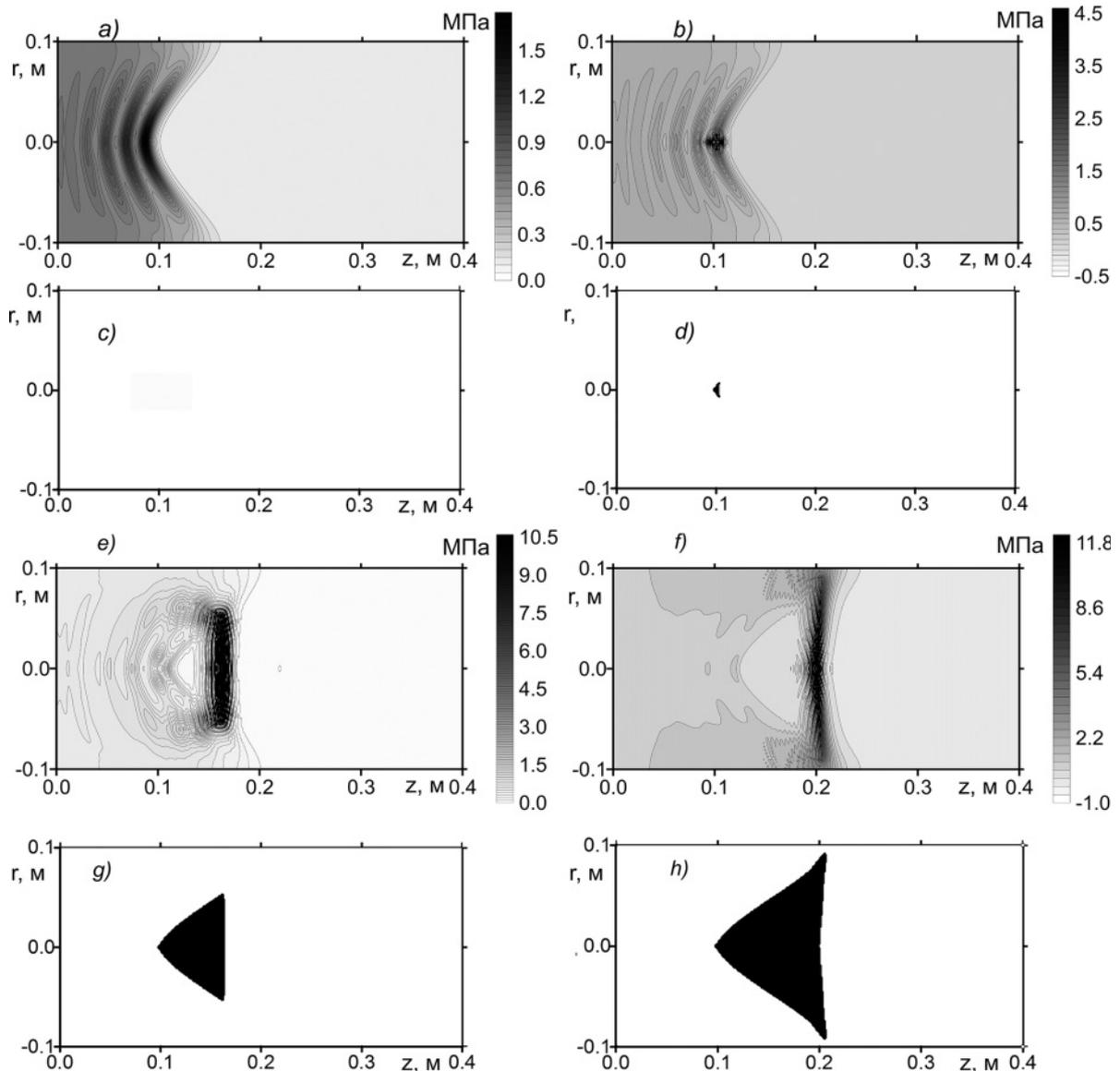


Рис. 1. Иницирование волн детонации при неоднородном распределении пузырьков по сечению трубы, когда объемное содержание пузырьков увеличивается к центру, для системы со следующими геометрическими и теплофизическими параметрами: газ – смесь ацетилена и кислорода ($C_2H_2+2,5O_2$): $\rho_0^g=1,26 \text{ кг/м}^3$, $\gamma_0=1,35$, $\lambda_g=2,49 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/(м}\cdot\text{с}\cdot\text{град)}$, $c_g=1,14 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{град)}$, $T_0=1000 \text{ К}$, $\Delta T=3200 \text{ К}$, $\alpha_{g0}^c=0,07$, $\alpha_{g0}^w=0,001$, $a_0=1,5 \text{ мм}$; жидкость – смесь глицерина с водой, $\rho_0^l=1126 \text{ кг/м}^3$, $\nu_l=0,75 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, $C_l=1700 \text{ м/с}$; $p_0=10^5 \text{ Па}$, $\Delta p_0=0,1 \text{ МПа}$, $T_0=300 \text{ К}$, $R_c=0,1$. Шкала рядом с полем давления соответствует значению давления в МПа

Fig. 1. Initiation of detonation waves in non-uniform distribution of bubbles in the cross section of the pipe when the volume content of bubbles increases towards the center, for a system with the following geometric and thermal parameters: gas – a mixture of acetylene and oxygen ($C_2H_2+2,5O_2$): $\rho_0^g=1,26 \text{ kg/m}^3$, $\gamma_0=1,35$, $\lambda_g=2,49 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/(м}\cdot\text{с}\cdot\text{гр)}$, $c_g=1,14 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{гр)}$, $T_0=1000 \text{ К}$, $\Delta T=3200 \text{ К}$, $\alpha_{g0}^c=0,07$, $\alpha_{g0}^w=0,001$, $a_0=1,5 \text{ мм}$; liquid – a mixture of glycerol and water, $\rho_0^l=1126 \text{ kg/m}^3$, $\nu_l=0,75 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, $C_l=1700 \text{ м/с}$; $p_0=10^5 \text{ Па}$, $\Delta p_0=0,1 \text{ МПа}$, $T_0=300 \text{ К}$, $R_c=0,1$. The scale next to the field of pressure corresponds to the pressure in MPa

волна, инициированная в осевой зоне, начинает распространяться в зону с меньшим объемным содержанием газа, причем фронт волны имеет плоскую форму. Картинки (f) и (h), соответствующие моменту времени 1,1 мс, показывают, что детонационная волна со временем распространяется практически по всему сечению канала. Отметим, что, хотя концентрация газовой фазы по сечению

канала линейно возрастает к центру, фронт детонационной волны по сечению канала практически однороден. Кроме того, со временем из-за поджатия осевой зоны наблюдается некоторое увеличение амплитуды детонационной волны.

На рис. 2 представлены эпюры давления по координате для разных значений в момент времени 1,0 мс (параметры расчета те же, что на рис. 1.) Из

рис. 2 видно, что амплитуда в центре трубы к моменту 1,0 мс приблизительно равна 12,0 МПа (линия 1), а вблизи стенок трубы (линия 2) составляет около 4,0 МПа. Для сравнения на рис. 3 представлены эпюры давлений для тех же параметров расчета, как для рис. 1, но для однородного распределения газовой фазы по сечению канала, причем линия 1 (верхняя картинка) соответствует объемному содержанию пузырьков 0,07, а линия 2 (нижняя картинка) – объемному содержанию 0,001. Видно (рис. 3), что в случае однородного распределения пузырьков по сечению трубы амплитуды волны давления типа «ступенька» величиной ~0,7 МПа недостаточно для того, чтобы возбудить детонацию. В этом случае профиль волны соответствует профилю нелинейной волны, распространяющейся в пузырьковой среде с неактивными пузырьками (например, заполненных воздухом), при этом характерные осцилляции связаны с радиальной инерцией пузырьковой жидкости. При неравномерном распределении газа по сечению трубы, даже если амплитуда первоначальной волны в начале распространения не может возбудить детонацию, при дальнейшей эволюции сигнала вглубь происходит его фокусировка в область, где объемное содержание больше, и возникают условия для иницирования детонации.

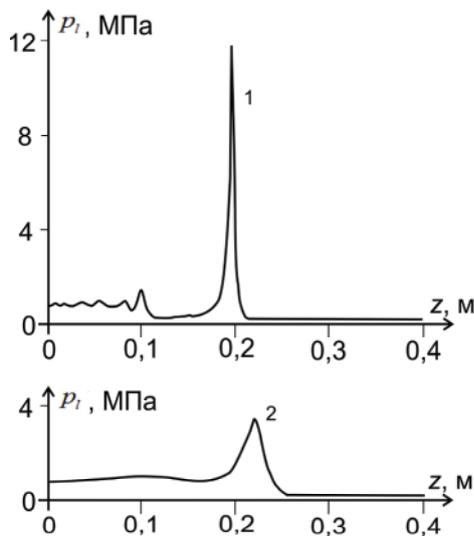


Рис. 2. Эпюры давления в момент времени 0,1 мс при неоднородном распределении пузырьков по сечению трубы, когда объемное содержание пузырьков увеличивается к центру от $\alpha_{g0}^v=0,001$ до $\alpha_{g0}^v=0,07$ (линия 1 соответствует оси трубы, линия 2 – стенкам трубы). Все геометрические и теплофизические параметры такие же, как на рис. 1

Fig. 2. Plots of pressure at a time of 0,1 ms at nonuniform distribution of bubbles over the tube section, when the volume content of bubbles increases from the center to the periphery from $\alpha_{g0}^v=0,001$ to $\alpha_{g0}^v=0,07$ (Line 1 corresponds to the tube axis, the line 2 – to the tube walls). All geometric and thermal parameters are the same as in Fig. 1

На рис. 4, 5 представлено распределение давления в пузырьковой жидкости, когда объемное со-

держание пузырьков увеличивается линейно от центра к стенке трубы по линейному закону, как для рис. 1, где $\alpha_{g0}^c=0,001$, $\alpha_{g0}^w=0,07$. Остальные начальные и граничные условия такие же, как на рис. 1.

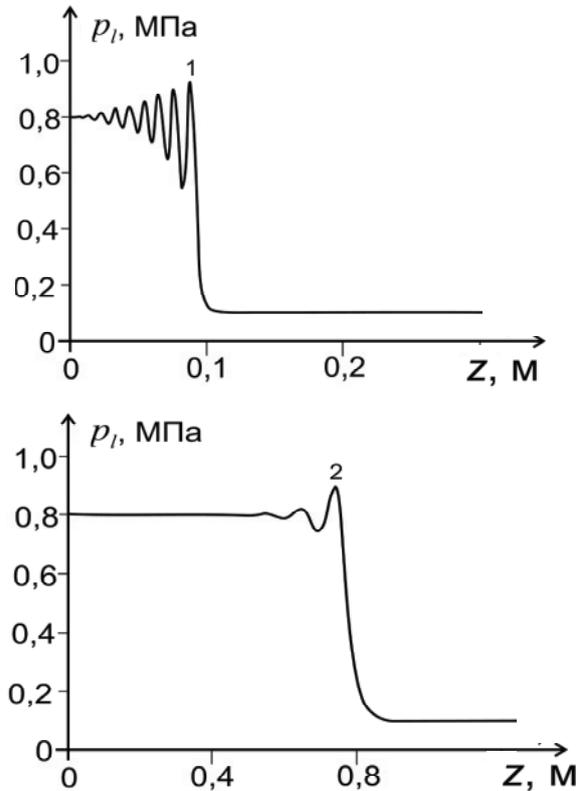


Рис. 3. Эпюры давления в момент времени 0,1 мс при однородном распределении пузырьков по сечению трубы (линия 1 соответствует $\alpha_{g0}^v=0,07$, линия 2 – $\alpha_{g0}^v=0,001$). Все остальные геометрические и теплофизические параметры такие же, как на рис. 1

Fig. 3. Plots of pressure at a time of 0,1 ms for homogeneous distribution of bubbles across the tube (Line 1 corresponds to the $\alpha_{g0}^v=0,07$, line 2 – $\alpha_{g0}^v=0,001$). All other geometric and thermal parameters are the same as in Fig. 1

На рис. 4 поля давления (а), (b), (е) и (f) и индикатора детонации (с), (d), (g) и (h) соответствуют моментам времени $t=0,8; 0,9; 1,1$ и $1,2$ мс. Профили волн давления в момент 1,2 мс для различных значений радиальной координаты r представлены на рис. 5. Из картинок (а) и (с) видно, что первоначальная волна давления при распространении фокусируется на участках около стенки трубы, где объемное содержание газа наибольшее.

При этом амплитуда реализующегося давления ~1,0 МПа недостаточна для иницирования детонации в системе и поэтому детонационный процесс не возбуждается. Из картинок (b) и (d) видно, что к моменту $t=0,9$ мс на участке трубы около стенки инициируется детонационная волна, амплитуда которой около 4,8 МПа. Из картинок (е) и (g) следует, что инициированная детонационная волна распространяется не только в положительном направлении оси z , но и к центру трубы, амплитуда

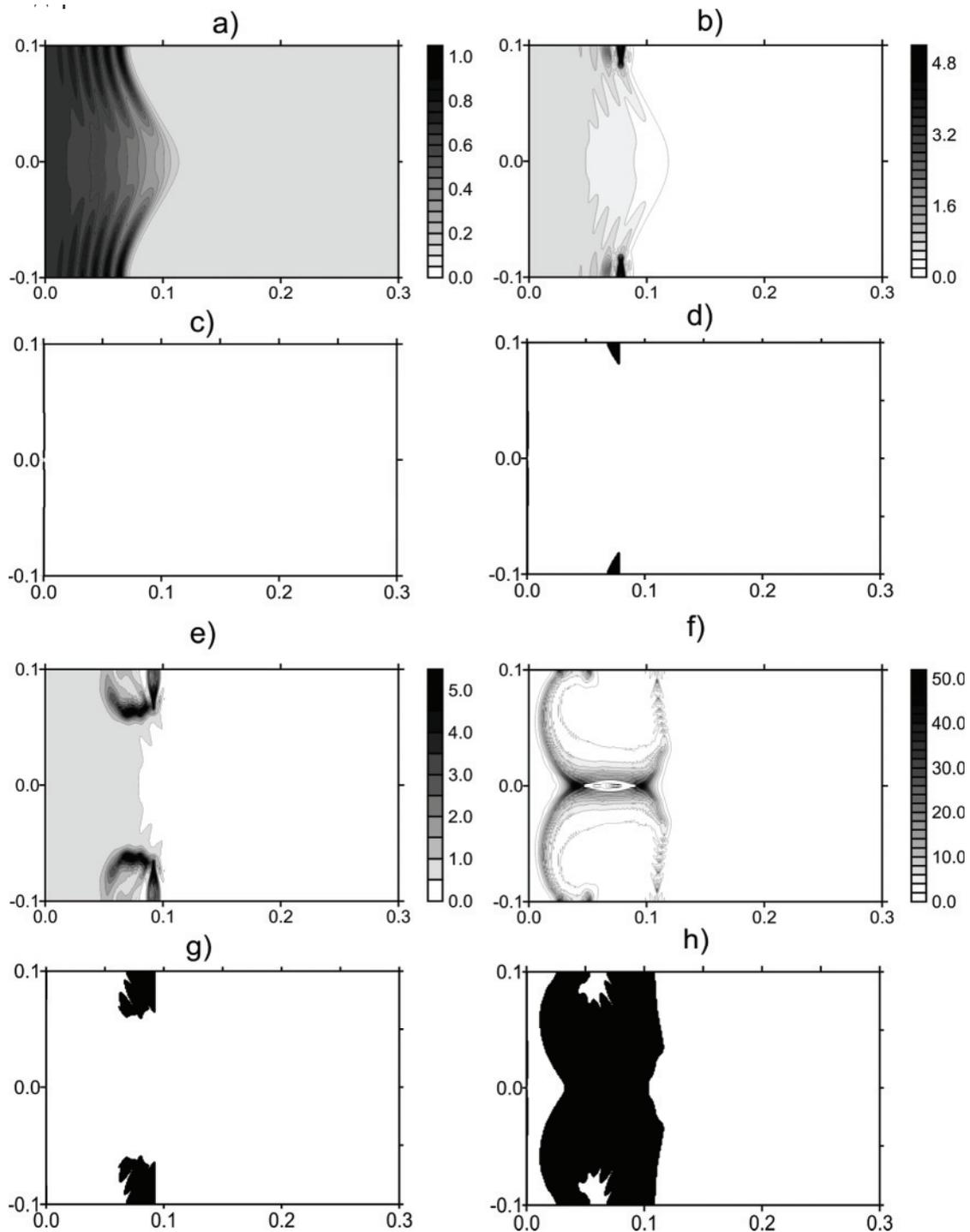


Рис. 4. Динамика волн при неоднородном распределении пузырьков по сечению трубы, когда объемное содержание пузырьков увеличивается от центра к стенкам трубы от $\alpha_{50}^c=0,001$ до $\alpha_{50}^w=0,07$. Остальные параметры такие же, как для рис. 1

Fig. 4. Dynamics of waves in inhomogeneous distribution of bubbles over the tube section, when the volume content of bubbles increases from the center to the walls of the tube from $\alpha_{50}^c=0,001$ to $\alpha_{50}^w=0,07$. All other geometric and thermal parameters are the same as in Fig. 1

детонационных волн при этом составляет около 6,0 МПа.

Картинки (f) и (h) на рис. 4, а также эпюры давления рис. 5 показывают динамику детонационной волны в момент 1,2 мс. Видно, что в этот мо-

мент времени детонационная волна распространяется не только в положительном направлении оси z , но и в обратном. Отметим, что детонационная волна, распространяющаяся к центру из периферии трубы, из-за геометрии увеличивает свою ам-

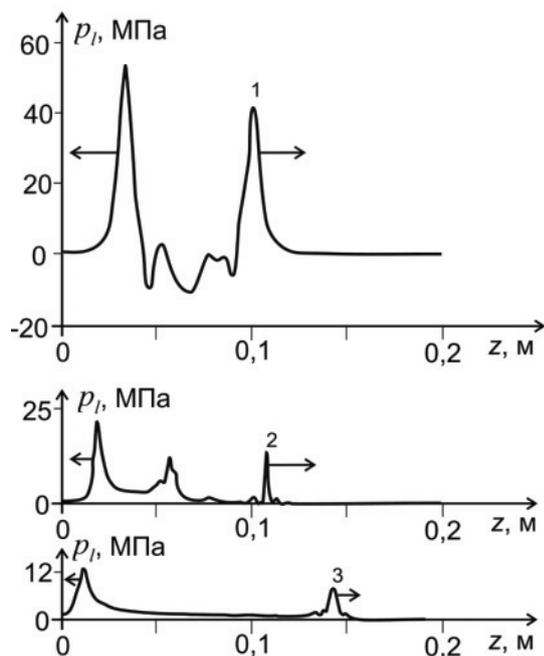


Рис. 5. Профили волны давления при неоднородном распределении пузырьков по сечению трубы, когда объемное содержание пузырьков увеличивается от центра к стенкам трубы от $\alpha_{g0}^* = 0,001$ до $\alpha_{g0}^* = 0,07$ в момент времени 1,2 мс. Линии 1, 2 и 3 соответствуют $r=0$, $r=R_w$ и $r=R_w/2$ соответственно

Fig. 5. Profiles of a pressure wave at non-uniform distribution of bubbles over the tube section, when the volume content of bubbles increases from the center towards the walls of the tube from $\alpha_{g0}^* = 0,001$ to $\alpha_{g0}^* = 0,07$ at time 1,2 ms. Lines 1, 2 and 3 correspond to $r=0$, $r=R_w$ and $r=R_w/2$ respectively

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Superabsorption of acoustic waves with bubble metascreens / V. Leroy, A. Strybulevych, M. Lanoy, F. Lemoult, A. Tourin, J.H. Page // *Phys. Rev. B.* – 2015. – V. 91. – P. 020301.
2. Ishii R., Matsuhisa H. Steady reflection, absorption and transmission of small disturbances by a screen of dusty gas // *J. Fluid Mech.* – 1983. – V. 130. – P. 259–277.
3. Lee K., Choi B.K., Yoon S.W. Acoustic pressure reflection coefficients of a subsurface bubble layer in water // *Journal of the Korean Physical Society.* – 2002. – V. 40. – № 2. – P. 256–263.
4. Tien T.M. Sound propagation through a bubble screen at finite gas-volume fraction. Master Thesis. – Tainan, Taiwan, 2001. – 71 p.
5. Sound velocity and attenuation in bubbly gels measured by transmission experiments / V. Leroy, A. Strybulevych, J.H. Page, M.G. Scanlon // *J. Acoust. Soc. Am.* – 2008. – V. 123. – № 4. – P. 1931–1940.
6. Temkin S. Suspension acoustics: an introduction to the physics of suspensions. – Cambridge: Cambridge University Press, 2005. – 398 p.
7. Prosperetti A. Vapor bubbles // *Ann. Rev. Fluid Mech.* – 2017. – V. 49. – P. 221–248.
8. Hasegawa T., Fujiwara T. Detonation in Oxyhydrogen Bubbled Liquids // *Proc. 19th Intern. Symp. on Combustion.* – Hafnia, 1982. – P. 675–683.
9. Баязитова А.Р., Гималтдинов И.К., Шагапов В.Ш. Волны давления в трубе, заполненной пузырьковой смесью с неоднород-

плитуду. Видно, что на оси трубы происходит столкновение детонационных волн и при этом их амплитуда увеличивается до 50 МПа и выше. Как видно из картинки (h), в зоне, где произошла детонация, остаются участки с непрогоревшим газом, что связано с тем, что детонация не инициируется на участках, которые предварительно поджаты волной давления [19–21]. Из анализа рис. 1–5 следует, что неоднородное по сечению трубы распределение взрывчатых пузырьков приводит к значительному уменьшению амплитуды первоначальной волны, способной инициировать детонацию. Для приведенных расчетов значение амплитуды давления составляет 0,7 МПа, что почти в 3 раза меньше амплитуды волны, способной инициировать детонацию, в случае однородного распределения взрывчатых пузырьков по сечению трубы при тех же параметрах системы.

Заключение

Исследована динамика детонационных волн в трубе с неоднородным распределением взрывчатых пузырьков по сечению.

Рассмотрены два случая: первый, когда объемное содержание пузырьков с взрывчатым газом увеличивается к центру трубы, второй – когда объемное содержание увеличивается к стенкам трубы. Для обоих случаев установлено, что волна с умеренной начальной амплитудой (0,7 МПа) может инициировать пузырьковую детонацию из-за фокусировки волны в область, где объемное содержание пузырьков наибольшее.

Работа поддержана грантами РФФИ, номера проектов 16–01–00432, 17–41–020244.

- нм распределением по сечению // *Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа.* – 2006. – № 3. – С. 67–78.
10. Распространение детонационных волн вдоль трубчатого пузырькового кластера, находящегося в жидкости / В.Ш. Шагапов, И.К. Гималтдинов, А.Р. Баязитова, Д.С. Спевак // *Теплофизика высоких температур* – 2009. – Т. 47. – № 3. – С. 424–431.
11. Динамика детонационных волн в кольцевом слое круглой трубы / А.Р. Баязитова, И.К. Гималтдинов, А.М. Кучер, В.Ш. Шагапов // *Известия РАН. Механика жидкости и газа.* – 2013. – Т. 48. – № 2. – С. 201–210.
12. Ждан С.А. Детонация столба химической активной среды в жидкости // *Физика горения и взрыва.* – 2003. – Т. 39. – № 4. – С. 107–112.
13. Ждан С.А., Ляпидевский В.Ю. Детонация в двухслойной пузырьковой среде // *Физика горения и взрыва.* – 2002. – Т. 38. – № 1. – С. 123–128.
14. Топольников А.С., Гималтдинов И.К. Динамика детонационных волн в каналах переменного сечения, заполненных пузырьковой жидкостью // *Теплофизика и аэромеханика.* – 2014. – Т. 21. – № 4. – С. 489–498.
15. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 1. – М: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 464 с.
16. 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. 1077–1081.

17. Николаев Ю.А., Топчиан М.Е. Расчет равновесных течений в детонационных волнах в газах // Физика горения и взрыва. – 1977. – Т. 13. – № 3. – С. 393–404.
18. Самарский А.А., Попов Ю.П. Разностные методы решения задач газовой динамики. – М.: Наука, 1980. – 352 с.
19. Сычев А.И. Влияние начального давления пузырьковых сред на характеристики волн детонации // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85. – № 4. – С. 126–129.
20. Сычев А.И. Влияние начального давления многокомпонентных пузырьковых сред на характеристики волн детонации // Журнал технической физики. – 2016. – Т. 86. – № 5. – С. 15–19.
21. Сычев А.И. Влияние начального давления полидисперсных пузырьковых сред на характеристики волн детонации // Журнал технической физики. – 2017. – Т. 87. – № 4. – С. 504–507.

Поступила 17.01.2018 г.

Информация об авторах

Гималтдинов И.К., доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Баязитова А.Р., кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной информатики и программирования Факультета математики и информационных технологии Стерлитамакского филиала Башкирского государственного университета.

UDC 532.329; 532.2.532

INITIATION AND PROPAGATION OF DETONATION WAVES IN A TUBE WITH BUBBLES INHOMOGENEOUS DISTRIBUTION OVER CROSS-SECTION

Ilias K. Gimaltdinov¹,

iljas_g@mail.ru

Alina R. Bayazitova²,

Estlina@mail.ru

¹ Ufa State Petroleum Technological University,
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, Russia.

² Sterlitamak branch of Bashkir State University,
49, Lenin avenue, Sterlitamak, 453103, Russia.

Relevance. Propagation of a detonation wave in a bubble liquid is a unique phenomenon, as the bubble detonation is initiated and propagated in the systems with very low energy content, but at the same time it has common features for all detonation waves (self-sustaining stationary process). Since bubble media are structurally different from chemically active homogeneous media (liquid, gaseous, solid explosives) and heterogeneous (gas-particles, foam, etc.), detonation in bubbling media has a number of features related to the specific bubble medium. Bubble liquids are a working medium in various industries related to oil refining, metallurgy, etc. In some cases, the bubble liquids are a working medium for technological processes (for example, liquid-phase oxidation of various gases), in others – an element of the explosion-proof system (safety fluid closures), therefore, it is necessary to develop scientific principles for selecting explosion-proof modes of technological processes in gas-liquid media and operation of liquid safety gates.

The aim of the research is to study the features of initiation and propagation of detonation in a bubble liquid with inhomogeneous distribution of explosive bubbles along the section of the tube.

The object of research is bubble liquids containing an explosive gas inside the bubbles.

The research method is based on solving a system of partial differential equations.

The results of the research showed that the non-uniform distribution of explosive bubbles along the tube cross section leads to a significant decrease in the amplitude of the initial wave, which can initiate detonation. In addition, it was found that when a detonation wave is propagated because of the preload, the sites remain unconfined.

Key words:

Two-dimensionality, detonation, wave, bubbles, liquid, gas.

The research was funded by the RFBR grants, project numbers 16–01–00432, 17–41–020244.

REFERENCES

1. Leroy V., Strybulevych A., Lanoy M., Lemoult F., Tourin A., Page J.H. Superabsorption of acoustic waves with bubble metascreens. *Phys. Rev. B*, 2015, vol. 91, pp. 020301.
2. Ishii R., Matsuhisa H. Steady reflection, absorption and transmission of small disturbances by a screen of dusty gas. *J. Fluid Mech.*, 1983, vol. 130, pp. 259–277.
3. Lee K., Choi B.K., Yoon S.W. Acoustic pressure reflection coefficients of a subsurface bubble layer in water. *Journal of the Korean Physical Society*, 2002, vol. 40, no. 2, pp. 256–263.
4. Tien T.M. *Sound propagation through a bubble screen at finite gas-volume fraction*. Master Thesis. Tainan, Taiwan, 2001. 71 p.
5. Leroy V., Strybulevych A., Page J.H., Scanlon M.G. Sound velocity and attenuation in bubbly gels measured by transmission experiments. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2008, vol. 123, no. 4, pp. 1931–1940.
6. Temkin S. *Suspension acoustics: an introduction to the physics of suspensions*. Cambridge, Cambridge University Press, 2005. 398 p.
7. Prosperetti A. Vapor bubbles. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 2017, vol. 49, pp. 221–248.
8. Hasegawa T., Fujiwara T. Detonation in Oxyhydrogen Bubbled Liquids. *Proc. 19th Intern. Symp. on Combustion*. Hafsa, 1982. pp. 675–683.
9. Bayazitova A.R., Gimaltdinov I.K., Shagapov V.Sh. Pressure waves in a tube filled with a bubbly mixture with a nonuniform cross-sectional bubble distribution. *Fluid Dynamics*, 2006, no. 3, pp. 381–390.
10. Shagapov V.S., Gimaltdinov I.K., Bayazitova A.R., Spevak D.S. Propagation of detonation waves along a tubular bubble cluster in liquid. *High Temperature*, 2009, vol. 47, no. 3, pp. 424–431.
11. Bayazitova R., Gimaltdinov I.K., Kucher A.M., Shagapov V.Sh. Dynamics of Detonation Waves in an Annular Layer of a Round Pipe. *Fluid Dynamics*, 2013, vol. 48, no. 2, pp. 201–210.
12. Zhdan S.A. A detonation of a column of chemically active bubble medium. *Physics of Combustion and Explosion*, 2003, vol. 39, no. 4, pp. 458–463.
13. Zhdan S.A., Liapidevskii V.Yu. Detonation in a two-layer bubbly medium. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2002, vol. 38, no. 1, pp. 109–113.
14. Topolnikov A.S., Gimaltdinov I.K. Dynamics of detonation waves in a channel with variable cross section and filled with bubbly fluid. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2014, vol. 21, no. 4, pp. 489–498.
15. Nigmatulin R.I. *Dynamics of Multiphase Media*: vol. 1, 2. New York, United States, Hemisphere Publ. Corp., 1990. 507 p.
16. Nigmatulin R.I., Shagapov V.Sh., Vakhitova N.K. Compressibility of carrier liquid in distribution of waves in bubbling environment. *Soviet Physics. Doklady*, 1989, vol. 34, no. 2, pp. 495–500.
17. Nikolaev I.A., Topchiian M.E. Calculation of equilibrium flows in detonation waves in gases. *Fizika Goreniia i Vzryva*, 1977, vol. 13, pp. 327–338.

18. Samarskiy A.A., Popov Yu.P. *Raznostnye metody resheniya zadach gazovoy dinamiki* [Differential methods of solving the problems of gas dynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1980. 352 p.
19. Sychev A.I. Influence of the initial pressure in bubble media on the detonation wave parameters. *Technical physics. The Russian journal of applied physics*, 2015, vol. 60, no. 4, pp. 603–606.
20. Sychev A.I. Effect of the initial pressure of multicomponent bubble media on the characteristics of detonation waves. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2016, vol. 61, no. 5, pp. 654–658.
21. Sychev A.I. Influence of the initial pressure of polydisperse bubble media on characteristics of detonation waves. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2017, vol. 62, no. 4, pp. 523–626.

Received: 17 January 2018.

Information about the authors

Ilias K. Gimaltdinov, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University.

Alina R. Bayazitova, Cand. Sc., associate professor, Sterlitamak branch of Bashkir State University.