

## **ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В ПУЗЫРЬКОВОЙ СРЕДЕ ПРИ НАКЛОННОМ ПАДЕНИИ**

**И.К. Гималтдинов, А.С. Родионов, Е.Ю. Кочанова**

*ФГБОУ ВО Уфимский государственный нефтяной технический университет  
450064, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1  
E-mail: moto8728@mail.ru*

Рассмотрен плоский канал, заполненный пузырьковой (газонасыщенной) и «чистой» жидкостью с границей раздела этих сред, расположенной под углом по длине канала. Изучен процесс инициирования детонационной волны в газонасыщенной жидкости на наклонной границе, исследовано влияние угла наклона границы на давление, необходимое для начала детонации в пузырьковой жидкости. Показана возможность уменьшения амплитуды давления путем изменения угла наклонной границы.

Ключевые слова: пузырьковая жидкость, детонация, инициирование взрыва, преломление через границу.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Детонационные волны (ДВ) могут возникать в различных средах, в том числе и сильно отличающихся по физико-химическим свойствам. Однако, во всех средах ДВ присущи общие признаки: детонация – самоподдерживающийся, автоволновой процесс. Энерговыделение в среде обеспечивает возможность существования самоподдерживающихся волн детонации.

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 [8-12] показана возможность: инициирования детонации волнами малой амплитуды при фокусировке волн в область пузырьковой завесы, конечных размеров; при отражении волн давления от жестких стенок и границ разделов сред с

различными физическими свойствами; при распространении волн в сужающихся каналах; при столкновении двух волн, которые по отдельности не могут инициировать детонацию.

В данной работе рассматриваются условия инициирования детонации при преломлении волны типа «ступенька», распространяющейся в пузырьковой смеси через границу, разделяющей области газожидкостной смеси и жидкости в случае, когда эта граница расположена под некоторым углом к фронту падающей волны.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим плоский канал, заполненный пузырьковой (газонасыщенной) и «чистой» жидкостью с границей раздела этих сред, расположенной под углом  $\varphi$  по длине канала (рис. 1). Предполагается, что газовая фаза пузырьковой жидкости является взрывчатой газовой смесью (например, смесь ацетилена с кислородом или гремучий газ). В момент времени  $t=0$  на границе  $x_0 = 0$  скачкообразно повышается давление амплитудой  $\Delta P_0$ . Необходимо определить динамику волнового процесса при  $t > 0$ .

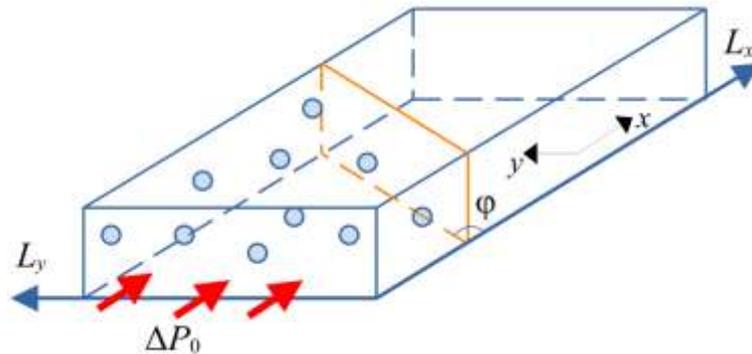


Рисунок 1 – Схема задачи

Волновое движение в предположении общих допущений для пузырьковых жидкостей описывается с помощью системы макроскопических уравнений масс, числа пузырьков, импульсов и давления в пузырьках (в лагранжевых координатах):

$$\frac{\partial p_l}{\partial t} = \frac{C_l^2 \rho_l^0}{(1-\alpha_g)} \left[ \frac{3\alpha_g}{a} w - \left( \frac{\alpha_g}{J} + \frac{\rho_{l0}}{J^2 \rho_l^0} \right) \frac{\partial J}{\partial t} \right], \quad \frac{\partial \alpha_g}{\partial t} = \frac{3\alpha_g}{a} w - \frac{\alpha_g}{J} \frac{\partial J}{\partial t},$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{J\rho} \left( \frac{\partial p_l}{\partial x_0} \frac{\partial y}{\partial y_0} - \frac{\partial p_l}{\partial y_0} \frac{\partial x}{\partial x_0} \right), \quad \frac{\partial x}{\partial t} = u,$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{J\rho} \left( \frac{\partial p_l}{\partial y_0} \frac{\partial x}{\partial x_0} - \frac{\partial p_l}{\partial x_0} \frac{\partial y}{\partial y_0} \right), \quad \frac{\partial y}{\partial t} = v, \quad \frac{\partial p_g}{\partial t} = -\frac{3\gamma p_g}{a} w - \frac{3(\gamma-1)}{a_0} q,$$

$$J = \frac{\partial x}{\partial x_0} \frac{\partial y}{\partial y_0} - \frac{\partial x}{\partial y_0} \frac{\partial y}{\partial x_0}, \quad \frac{\partial J}{\partial t} = \frac{\partial u}{\partial x_0} \frac{\partial y}{\partial y_0} - \frac{\partial u}{\partial y_0} \frac{\partial y}{\partial x_0} + \frac{\partial x}{\partial x_0} \frac{\partial v}{\partial y_0} - \frac{\partial x}{\partial y_0} \frac{\partial v}{\partial x_0}.$$

где  $\rho_i^0$ ,  $\alpha_i$ ,  $p_l$ ,  $n$ ,  $a$  – соответственно плотность, объемное содержание  $i$ -й фазы, давление несущей жидкости, число и радиус пузырьков,  $u$  и  $v$  – проекции скорости на оси координат  $x$  и  $y$  соответственно. Нижними индексами  $i = l, g$  отмечены параметры жидкой и газовой фаз.

При описании радиального движения будем полагать, что  $w = w_A + w_R$ , где  $w_R$  определяется из уравнения Релея – Ламба,  $w_A$  определяется из решения задачи о сферической разгрузке на сфере радиуса  $a$  в несущей жидкости в акустическом приближении:

$$\frac{\partial a}{\partial t} = w = w_R + w_A,$$

$$\frac{\partial w_R}{\partial t} = \left[ \frac{p_g - p_l}{\rho_l^0} - \frac{3}{2} w_R^2 - 4\nu_l \frac{w_R}{a} \right] \frac{1}{a}, \quad w_A = \frac{p_g - p_l}{\rho_l^0 C_l \alpha_g^{1/3}},$$

Для определения относительной скорости фаз можно записать следующее уравнение

[10,27]:

$$|v_{lg}| = \sqrt{u_{lg}^2 + v_{lg}^2},$$

$$\frac{\partial u_{lg}}{\partial t} = -2 \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{3}{a} w u_{lg} - \frac{3 f_x}{2 \pi a^3 \rho_l^0}, \quad \frac{\partial v_{lg}}{\partial t} = -2 \frac{\partial v}{\partial t} - \frac{3}{a} w v_{lg} - \frac{3 f_y}{2 \pi a^3 \rho_l^0},$$

Силу вязкого трения примем в виде:

$$f_x = \frac{1}{2} C_D \pi a^3 u_{lg} |v_{lg}|, \quad f_y = \frac{1}{2} C_D \pi a^3 v_{lg} |v_{lg}|,$$

Коэффициент сопротивления  $C_D$  зададим в следующем виде [27]:

$$C_D = \begin{cases} \frac{48}{\text{Re}}, & 0 \leq \text{Re} < 180, \\ \frac{\text{Re}^{4/3}}{10^{3,6}}, & \text{Re} > 180, \end{cases}, \quad \text{Re} = \frac{2a |v_{lg}|}{\nu_l},$$

Для описания интенсивности межфазного теплообмена примем схему, учитывающую скольжение фаз [9,10]. При учете скольжения фаз полагается, что происходит обновление поверхности пузырька, тепловой поток при этом определяется теплопроводностью жидкости:

$$q = \text{Nu}_l \lambda_l \frac{T_g - T_0}{2a}, \quad \frac{T_g}{T_0} = \frac{p_g}{p_0} \left( \frac{a}{a_0} \right)^3, \quad \text{Nu}_l = 0,65 \sqrt{\text{Pe}_l},$$

$$Re_l = \frac{2a|v_{lg}|}{k_l}, \quad k_l = \frac{\lambda_l}{\rho_l^0 c_l}$$

В качестве газовой фазы для расчетов принимается ацетилено-кислородная стехиометрическая смесь  $C_2H_2+2.5O_2$ . Такой выбор газовой фазы обусловлен тем, что она использовалась в большинстве экспериментов [4-6]. В качестве жидкой фазы – водоглицериновый раствор с массовой долей глицерина 0.5 [4-6]. Для ацетилено-кислородной стехиометрической смеси за температуру воспламенения и добавку к температуре газа приняты следующие значения:  $T_* = 1000$  К,  $\Delta T = 3200$  К [28].

Система уравнений в лагранжевых координатах решалась численно по явной схеме [28]. Для того, чтобы различать области, где произошла детонация, а где нет, вводится индикатор детонации.

#### НАЧАЛЬНЫЕ И ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

Условия при  $t = 0$ , соответствующие исходному состоянию системы, состоящей из областей однородной газожидкостной смеси и жидкости в канале, разделенных границей с наклоном, запишутся в виде:

$$u = v = 0, p_l = p_0, p_g = p_0, a = a_0, w = 0, T_g = T_0, \rho = \rho_{l0}^0 (1 - \alpha_{g0}),$$

$$\alpha_g = \begin{cases} \alpha_{g0}, & (x_0, y_0) \in \Omega_1, \\ 0, & (x_0, y_0) \notin \Omega_1, \end{cases} \quad \Omega_1 = \begin{cases} 0 \leq y_0 \leq L_y, \\ 0 \leq x_0 \leq x_{01} + \frac{y_0}{L_y} (x_{02} - x_{01}). \end{cases}$$

Иницирующее возмущение давления на границе пузырьковой жидкости ( $x_0 = 0$ ) задается в виде сигнала в форме «ступеньки». Соответствующее граничное условие запишется в виде:

$$p(t, y_0) = p_0 + \Delta p_0 \quad \text{при } x_0 = 0,$$

На границах  $y_0 = 0$  и  $y_0 = L_y$  расчетной области приняты условия как на жесткой стенке, т.е. равенство нулю нормальной компоненты скорости. На границе  $x_0 = L_x$  задается неотражающее граничное условие на основе импедансного соотношения [12]. Схематическая постановка задачи представлена на рис. 1.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На рисунке 2 показан момент времени, когда импульс давления формы «ступенька» величиной 6 атмосфер только дошел до границы раздела «пузырьковая жидкость – чистая жидкость». Такое значение граничного давления не способно вызвать детонацию в пузырьковой жидкости, поэтому, как следует из анализа рисунка 2, заметного увеличения давления не происходит, и амплитуда колебаний давления остается в пределах 6 атмосфер.

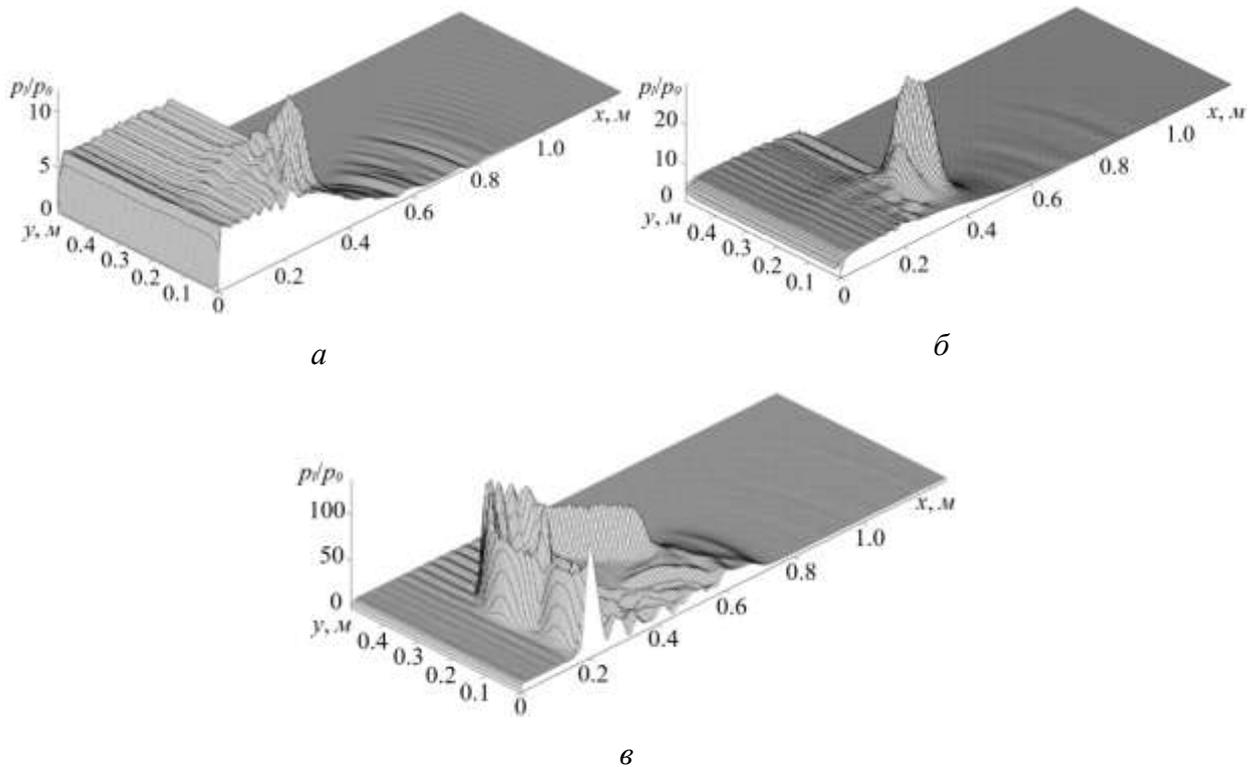


Рисунок 2 – Эпюры давления для момента времени: а – 7.5, б – 12.2, в – 15.1 мкс.

Параметры системы: газ – ацетилено-кислородная смесь, жидкость – 50% по массе водоглицериновый раствор:  $p_0 = 0.1$  МПа,  $\Delta p_0 = 0.6$  МПа,  $T_0 = 293$  К,  $\rho_l^0 = 1130$  кг/м<sup>3</sup>,  $\nu_l = 6 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с,  $c_l = 3.3$  кДж/(кг·К),  $\lambda_l = 0.42$  Вт/(м·К),  $C_l = 1700$  м/с,  $\rho_g^0 = 1.29$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda_g = 2.6 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м·К),  $\alpha_{g0} = 0.01$ ,  $a_0 = 1.25$  мм,  $\gamma = 1.36$ ,  $L_x = 1.2$  м,  $L_y = 0.5$  м,  $x_{01} = 0.2$  м,  $x_{02} = 0.49$  м,  $\varphi = 30^\circ$ .

При достижении границы «пузырьковая жидкость – чистая жидкость» происходит взаимодействие волны давления с этой границей, так как вследствие разницы акустических импедансов сред [9], этот процесс будет аналогичен удару волны о жесткую стенку, что приведет к резкому увеличению амплитуды давления.

Рассмотрим эпюры давления (рисунок 2а) для момента времени 12,2 мкс. На данном рисунке показано возникновение детонации пузырьковой жидкости, детонация

произошла в точке с координатами (0.345; 0.125). Вследствие наклонного расположения границы раздела сред, произошел поворот направления скоростей вдоль данной границы, что привело к интерференции волн и последующему увеличению амплитуды давления до значений, необходимых для детонации пузырьковой жидкости.

Детонация, произошедшая в момент времени 12.2 мкс, начинает «поджигать» соседние пузырьки и приводит к резкому повышению давления (рисунок 2 б) и последующему образованию взрывной волны. На рисунке 2 в показано дальнейшее распространение этой волны в жидкости. По эпюрам давления, представленным на рисунке, можно сделать вывод о круговом характере распространения волны.

На рисунке 4 показана зависимость минимального давления, необходимого для детонации, от угла наклона границы раздела «пузырьковая жидкость – чистая жидкость», расчеты проведены при фиксированном  $\alpha_{g0} = 0.01$ .

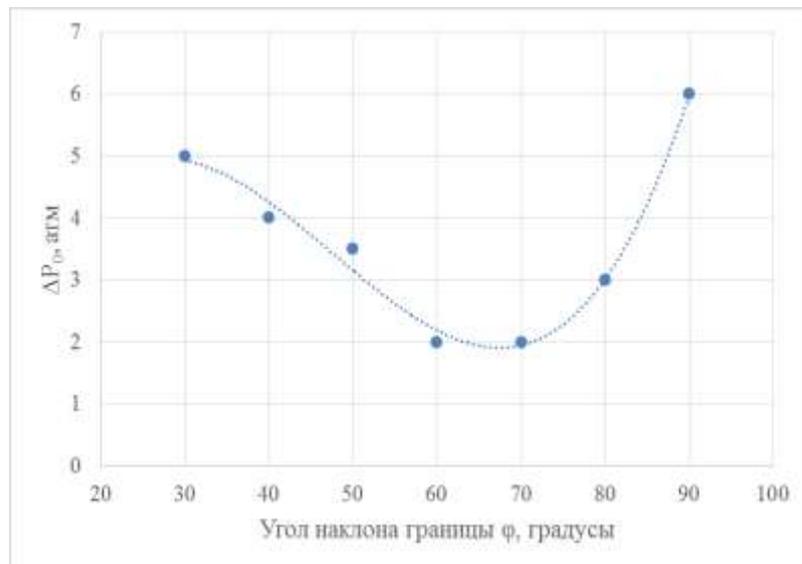


Рисунок 3 – Зависимость минимального давления, необходимого для детонации, от угла наклона границы раздела «пузырьковая жидкость – чистая жидкость» при  $\alpha_{g0} = 0.01$ .

Остальные параметры такие же как на рисунке 2.

Из анализа рисунка 3 следует, что расположение границы способно повлиять на возможность возникновения детонации в рассматриваемой системе и значительно снизить давление, необходимое для детонации пузырьковой жидкости. Так, увеличение угла наклона от 30 до 60 градусов приводит к тому, что минимальное давление «ступеньки»  $\Delta P_0$ , способное начать детонацию в пузырьковой жидкости, уменьшается в 2 раза. Дальнейшее увеличение угла наклона ведет к увеличению давления, необходимого для детонации. Примечательно, что при прямой границе ( $\varphi = 90^\circ$ ) детонация происходит при

заметно больших значениях  $\Delta P_0$ , чем при меньших углах наклона, например, при  $\varphi=70^\circ$  детонация происходит при в 3 раза меньшем давлении, чем при  $\varphi = 90^\circ$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что наклонное расположение границы раздела «пузырьковая жидкость – чистая жидкость» способно привести к детонации при инициирующем давлении до 3 раз меньшем, чем при прямой границе. Выявлена зависимость минимального давления, необходимого для детонации, от угла наклона границы раздела «пузырьковая жидкость – чистая жидкость». Минимальное значение давления, необходимого для инициирования детонации, достигается при угле наклона границы  $\varphi = 60^\circ-70^\circ$ .

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки России в сфере научной деятельности FEUR-2020-0004 «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 - газовые пузырьки» // ФГВ.1987. Т. 23. № 6. С. 76.
5. Сычев А.И. Влияние размера пузырьков на характеристики волны 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 проволочки // 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. Нигматулин Р.И., Шагапов В.Ш., Гималтдинов И.К., Ахмадуллин Ф.Ф. Взрыв пузырьковой зоны волнами малой амплитуды. Доклады РАН. 2005

9. *Гималтдинов И.К., Левина Т.М.* Особенности динамики детонационных волн в пузырьковой жидкости при прохождении границы раздела «водолицериновый раствор - масло» // Известия ТПУ. Инжиниринг ресурсов. 2017. Т. 328. № 8. С. 55.
10. *Галимзянов М.Н., Гималтдинов И.К., Лепихин С.А.* Инициирование детонационных волн в каналах переменного сечения, заполненных жидкостью с пузырьками горючего газа // ТВТ. 2010. Т. 48. № 2. С. 234.
11. *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.
12. *Кедринский В.К.* Гидродинамика взрыва: эксперимент и модели. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2000. 435 с.

### **Сведения об авторах**

1. Гималтдинов Ильяс Кадирович  
Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Россия,  
доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика»  
E-mail: iljas\_g@mail.ru
2. Родионов Артем Сергеевич  
Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Россия,  
кандидат физ.-мат. наук, доцент кафедры «Физика»  
E-mail: artrodionov@mail.ru
3. Кочанова Екатерина Юрьевна  
Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Россия,  
ассистент кафедры ВТИК  
E-mail: moto8728@mail.ru (ответственный за переписку)