

УДК 532.329; 532.2.532

ОТРАЖЕНИЕ ВОЛНЫ ПУЗЫРЬКОВОЙ ДЕТОНАЦИИ ОТ ГРАНИЦ

**REFLECTION OF WAVE OF BUBBLE DETONATION
FROM BOUNDARIES**

Гималтдинов И. К., Столповский М. В., Левина Т. М.

**Уфимский государственный нефтяной технический университет,
г. Уфа, Российская Федерация**

I. K. Gimaltdinov, M. V. Stolpovskii, T. M. Levina

**Ufa State Petroleum Technological University,
Ufa, Russian Federation**

e-mail: iljas_g@mail.ru

Аннотация. Детонация – самоподдерживающийся процесс, существующий в химически активных средах. Возможность распространения волны детонации обеспечивается энергосвободением в среде, компенсирующим энергозатраты детонационной волны на необратимое преобразование среды. Явление детонации в пузырьковых средах обнаружено в [1].

Волна пузырьковой детонации существует в химически активных пузырьковых средах. К таким системам относятся «химически неактивная жидкость – смесь пузырьков химически активного газа» [2] и «жидкое горючее – пузырьки газообразного окислителя» [3]. Обладая общими для всех детонационных волн признаками (это самоподдерживающийся, автоволновой стационарный процесс), волна «пузырьковой» детонации имеет специфические черты, проявляющиеся в структуре, свойствах и механизме распространения. Изучению детонационных волн в пузырьковых средах посвящены работы [4 – 16].

В работе [17] показана возможность инициирования детонации из пузырьковой смеси со взрывчатым газом в область взрывчатого газа, находящуюся над пузырьковой жидкостью. В опытах пузырьковая детонация возбуждалась взрывом проволоочки в пузырьковой среде. Исследовано разрушение границы пузырьковой среды при отражении от нее волны пузырьковой детонации. Эксперименты проводились при различных расстояниях между проволоочкой и границей газожидкостной среды. Это расстояние уменьшали до 1 см, когда происходил взрыв газа горячими продуктами от взрыва проволоочки. Определена вероятность передачи детонационного процесса из газожидкостной среды в объем взрывчатого газа в зависимости от расстояния от проволоочки до границы газожидкостной среды. Предварительный анализ указывает на то, что детонационная волна, преломленная из пузырьковой жидкости в область взрывчатого газа, не может инициировать детонацию в области газа, т.к. от свободной поверхности детонационная волна отражается как от свободной поверхности, а волна сжатия, проходящая в область взрывчатого газа, имеет небольшую амплитуду, которая недостаточна для инициирования детонации. Цель настоящей работы – исследовать процесс отражения детонационных волн от свободной поверхности.

Abstract. Detonation is a self-sustaining process that exists in chemically active media. The possibility of propagation of the detonation wave is provided by energy release in a medium that compensates the energy costs of the detonation wave for an irreversible transformation of the medium. The phenomenon of detonation in bubble media was found in [1].

A wave of bubble detonation exists in chemically active bubbling media. Such systems include – «chemically inactive liquid – mixture of bubbles of chemically active gas» [2] and «liquid fuel – bubbles of gaseous oxidizer» [3]. Possessing features common to all detonation waves (this self-sustaining, autowave stationary process), the wave of «bubble» detonation has specific

features that manifest itself in the structure, properties, and mechanism of propagation. Studies of detonation waves in bubbling media are devoted to [4-16].

The possibility of initiating a detonation from a bubble mixture with an explosive gas into the region of the explosive gas above the bubble liquid is shown in [17]. In experiments, bubble detonation was excited by the explosion of a wire in a bubble medium. The destruction of the boundary of a bubble medium is considered when a bubble detonation wave is reflected from it. The experiments were carried out at different distances between the wire and the boundary of the gas-liquid medium, this distance was reduced to 1 cm when a gas explosion occurred by the hot products from the explosion of the wire. The probability of transmission of the detonation process from the gas-liquid medium to the volume of the explosive gas is determined as a function of the distance from the wire to the boundary of the gas-liquid medium. Preliminary analysis indicates that a detonation wave refracted from the bubble liquid into the region of the explosive gas can not initiate detonation in the gas region, since from the free surface, the detonation wave is reflected both from the free surface and the compression wave passing into the region of the explosive gas has a small amplitude that is insufficient to initiate detonation. The purpose of this paper is to investigate the process of reflection of detonation waves from a free surface.

Ключевые слова: детонация, волна, пузырьки, жидкость, газ, инерция, объемное содержание.

Key words: detonation, wave, bubbles, liquid, gas, inertia, volume content.

Основные уравнения

Запишем систему макроскопических уравнений описывающих волновое движение в пузырьковой жидкости в переменных Лагранжа [4, 11]:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{1}{J\rho_l^0} \left(-\frac{\partial p_l}{\partial x_0} \right), \quad \frac{\partial x}{\partial t} = v, \quad (1)$$

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

$$\frac{\partial p_g}{\partial t} = -\frac{3\gamma p_g}{a} w - \frac{3(\gamma-1)}{a} q, \quad (3)$$

$$\frac{\partial a}{\partial t} = w = w_R + w_A, \quad (4)$$

$$a \frac{\partial w_R}{\partial t} + \frac{3}{2} w_R^2 + 4\nu_l \frac{w_R}{a} = \frac{p_g - p_l}{\rho_l^0}, \quad w_A = \frac{p_g - p_l}{\rho_l^0 C_l \alpha_g^{1/3}}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \alpha_g}{\partial t} = \frac{3\alpha_g}{a} w - \frac{\alpha_g}{J} \frac{\partial J}{\partial t}, \quad (6)$$

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

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

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

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

$$J = \frac{\partial x}{\partial x_0}, \quad \frac{\partial J}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial x_0},$$

где a – радиус пузырьков; p_l – давление несущей жидкости; ρ_l^0 – истинная плотность фаз; α_i – объемное содержание фаз; n – количество пузырьков в единице объема; v – скорость; γ – показатель адиабаты; q – тепловой поток между жидкостью и газом, отнесенный к единице площади межфазной поверхности; w – радиальная скорость пузырьков; ν_l – вязкость жидкости; C_l – скорость звука в «чистой» жидкости; w_R , w_A – радиальные скорости пузырьков; B – приведенная

газовая постоянная; $T_0 = \text{const}$ – температура жидкости; Nu_g и Re_g – числа Нуссельта и Пекле; k_g – коэффициент температуропроводности газов; c_g и λ_g – теплоемкость и теплопроводность газов. Индекс 0 внизу относится к начальному невозмущенному состоянию, индексами $i = l, g$ отмечены параметры жидкой и газовой фаз.

Из уравнений (1) – (6) при $\alpha_g = 0$ следуют уравнения для акустически сжимаемой жидкости. Система (1) – (6) решается численно, для решения дифференциальных уравнений используется равномерная сетка с узлами в точках $(x_{0i+1/2}, t_{j+1/2})$:

$$\begin{aligned} x_{0i+1/2} &= x_{0i} + 0.5h, \quad i = 0, 1, \dots, N-1, \\ x_0 &= 0, \quad x_{0N} = L, \quad t_{j+1/2} = t_j + 0.5\tau, \quad j = 0, 1, 2, \dots \end{aligned}$$

где h – шаг по координате; τ – шаг по времени. Их значения выбираются из условия Куранта [18]. К целым точкам будем относить параметры эйлеровой координаты x и скорости v , а к полуцелым точкам – все остальные параметры [18].

Результаты расчетов. Будем полагать, что в начальный момент времени ($t = 0$) пузырьковая жидкость покоится. Тогда начальные условия имеют вид:

$$p_l = p_0, \quad v = 0, \quad \rho = \rho_0; \quad \alpha_g = \alpha_{g0}, \quad \rho_0 = \rho_{l0}^0 (1 - \alpha_{g0}), \quad p_g = p_0, \quad a = a_0, \quad w = 0.$$

Иницирующий импульс на границе расчетной области задается в следующем виде для скорости поршня:

$$v_0(t, r_0) = \begin{cases} \Delta v_0 \exp\left(-\left(\frac{t-t_*/2}{t_*/6}\right)^2\right), & 0 < t < t_* \\ 0, & t > t_* \end{cases} \quad \text{при } x_0 = 0.$$

Рассмотрим отражение волны сжатия в «чистой» без пузырьков жидкости. На рисунке 1 представлены эюры давления, соответствующие моментам времени 20 и 40 мкс и показывающие распространение и

отражение колоколообразного импульса в «чистой» (без пузырьков жидкости). Для параметров системы «жидкость – водоглицериновая смесь» с объемным содержанием глицерина 70 % приняты следующие значения: $\rho_{l0}^0 = 1130 \text{ кг/м}^3$, $\nu_l = 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $C_l = 1700 \text{ м/с}$. Параметры импульсного сигнала полагались равными $\Delta v_0 = 0.15 \text{ м/с}$, $t_* = 60 \text{ мкс}$. Из рисунка 1 также видно, что под действием удара в жидкости формируется колоколообразный импульс с амплитудой $\Delta p_{l0} = p_l - p_0 \approx 0.2 \text{ МПа}$. К моменту 200 мкс передний фронт импульса распространяется до значения $x \approx 0.34 \text{ м}$. Импульс давления на границе $x=L$ отражается. Так как эта граница является свободной поверхностью, поэтому от этой границы импульс отражается как волна разрежения. В момент 400 мкс видно, что импульс разрежения распространяется слева направо с такой же амплитудой, как импульс сжатия. Очевидно, что на рисунке 1 представлен «идеальный» случай, т.к. при такой амплитуде волны разрежения на границе должно происходить вскипание жидкости.

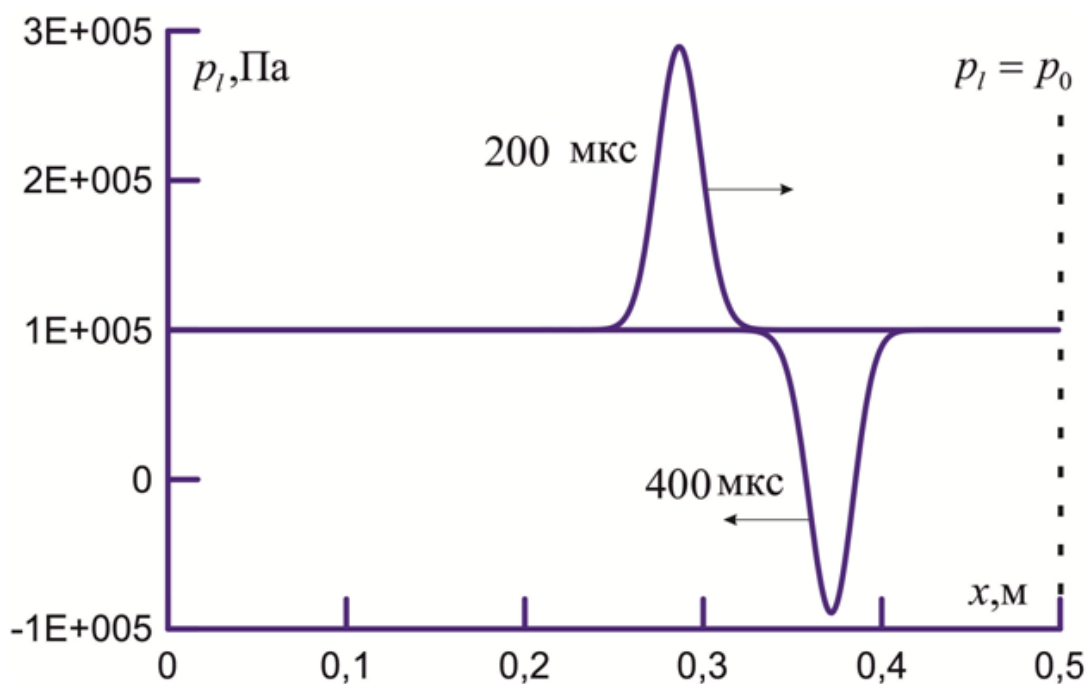


Рисунок 1. Эпюры давления в различные моменты времени в процессе отражения волны сжатия от свободной поверхности

На рисунке 2 представлены эпюры давления для различных моментов времени, когда по пузырьковой жидкости распространяется детонационная волна. Параметры системы «жидкость – водоглицериновая смесь» с объемным содержанием глицерина 70 % полагались равными $\rho_{l0}^0 = 1130 \text{ кг/м}^3$, $\nu_l = 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $C_l = 1700 \text{ м/с}$; газ – ацетиленокислородная смесь ($\text{C}_2\text{H}_2 + 2.5\text{O}_2$) $\alpha = 0.01$, $a_{g0} = 1.25 \text{ мм}$, $\rho_{g0}^{(0)} = 1.26 \text{ кг/м}^3$, $\lambda_g = 2.49 \times 10^{-2} \text{ Вт/(м*К)}$, $\gamma = 1.35$, $c_g = 1.14 \times 10^3 \text{ Дж/кг*К}$, $T_* = 1000 \text{ К}$, $\Delta T = 3200 \text{ К}$, $\alpha_{g0} = 0.01$.

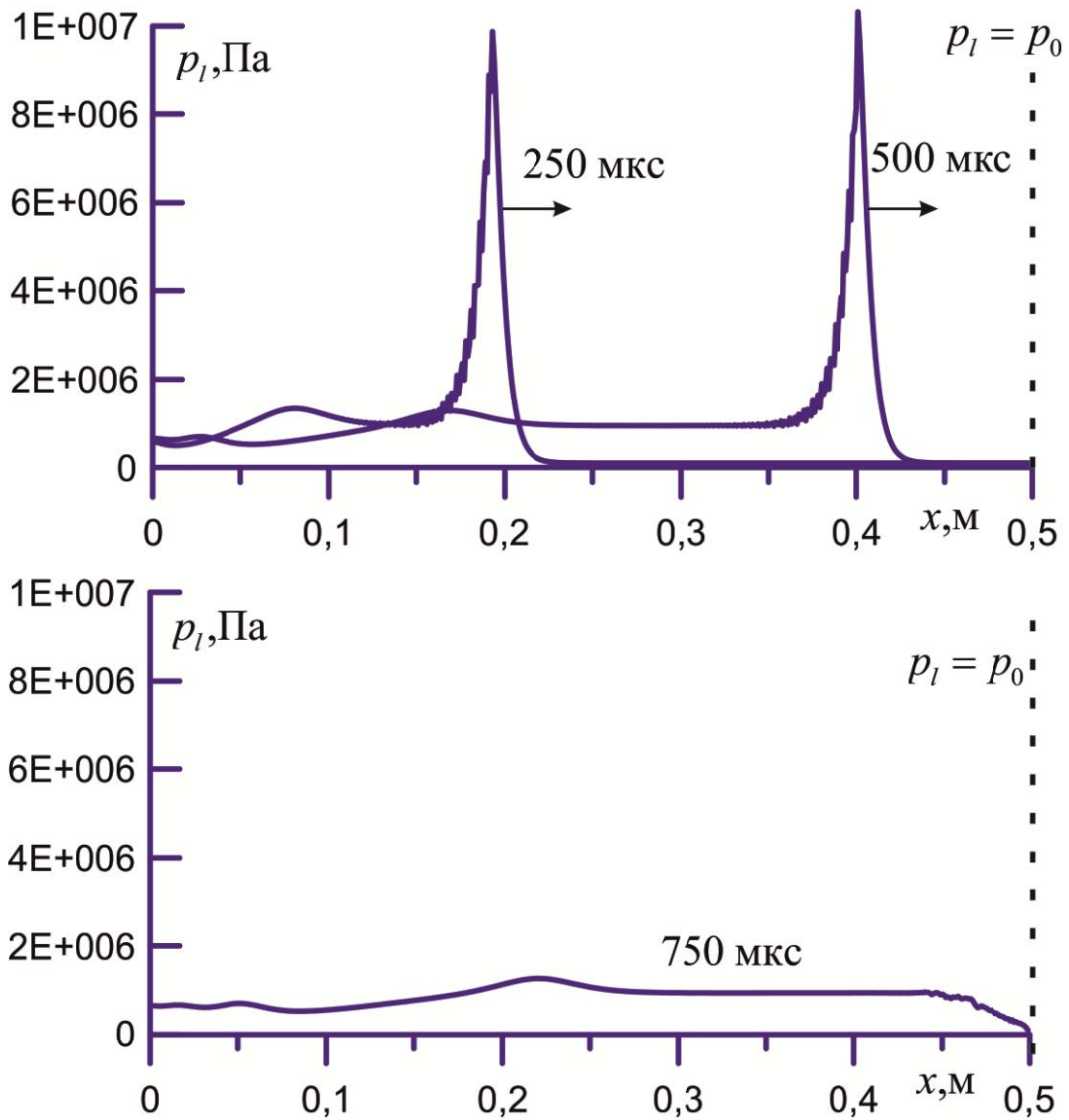


Рисунок 2. Эпюры давления при динамике детонационного солитона

Как видно из эюр давления, соответствующих моментам 250 и 500 мкс, детонационный солитон амплитудой ~ 10 МПа и протяженностью ~ 70 мкс распространяется со скоростью ~ 800 м/с, не меняя своей протяженности и амплитуды. Эюра давления, соответствующая моменту 750 мкс, показывает отраженную волну от границы $x = L$, т.к. пузырьковая жидкость является аномально сжимаемой средой, и при отражении детонационной волны от свободной поверхности амплитуда волны разрежения небольшая ($\Delta p_l \sim p_0$).

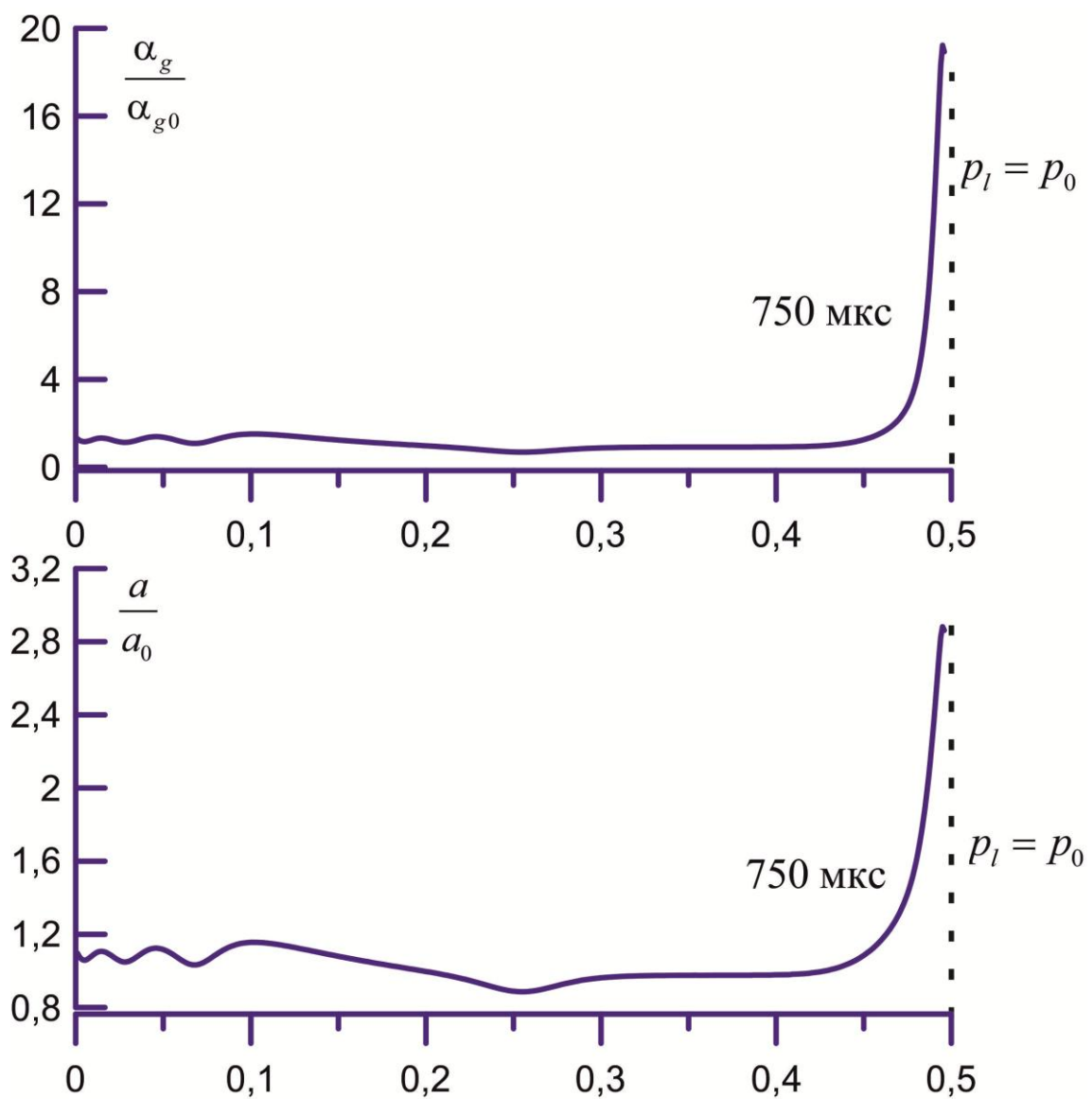


Рисунок 3. Объемное содержание и радиус пузырьков при отражении детонационной волны от свободной поверхности

На рисунке 3 представлены распределения объемного содержания и радиуса пузырьков в момент времени 750 мкс. Из анализа рисунка 3 видно, что радиус пузырьков увеличивается более чем в 3 раза по сравнению с начальным, т.е. на границе «пузырьковая жидкость – газ» радиус пузырьков достигает значения более 3.75 мм. Объемное содержание газа при этом возрастает более в 20 раз по сравнению с первоначальным, т.е. достигает значения $\alpha_g = 0.2$. Таким образом, при отражении детонационной волны от свободной поверхности происходит увеличение радиуса пузырьков и объемного содержания газа, т.е. на границе «пузырьковая жидкость – газ» при отражении детонационной волны образуется пенная структура. Волна сжатия, которая преломляется в область газа, будет иметь небольшую амплитуду, неспособную инициировать детонацию в области газа.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (соглашения № 16-01-00432, № 17-41-020244).

Список используемых источников

- 1 Сычев А. И. Волна детонации в системе жидкость – пузырьки газа // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21. № 3. С. 103-110.
- 2 Сычев А. И., Пинаев А. В. Самоподдерживающаяся детонация в жидкостях с пузырьками взрывчатого газа // ПМТФ. 1986. № 1. С. 133-138.
- 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 Гималтдинов И. К., Арсланбекова Р. Р., Левина Т. М. Особенности динамики постдетонационных волн // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23. № 3. С. 371-384.

5 Gimaltdinov I. K., Kucher A. M. Detonation waves in a multicomponent bubble liquid // High Temperature. 2014. Т. 52. No. 3. P. 411-416.

6 Баязитова Я. Р., Гималтдинов И. К. О динамике звуковых волн в трубке с эластичными стенками, заполненной пузырьковой жидкостью // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика. 2014. Т. 6. № 4. С. 13-19.

7 Bayazitova A. R., Gimaltdinov I. K., Kucher A. M., Shagapov V. S. Dynamics of detonation waves in an annular layer of a round pipe // Fluid Dynamics. 2013. Т. 48. No. 2. P. 201-210.

8 Шагапов В. Ш., Гималтдинов И. К., Кучер А. М. Детонационные волны в жидкости с пузырьками, частично состоящими из инертного газа // Вестник Башкирского университета. 2013. Т. 18. № 3. С. 630-635.

9 Bayazitova Ya. R., Gimaltdinov I. K., Bayazitova A. R. Features of the dynamics of detonation waves in layered bubble systems // Tyumen State University Herald. 2013. No. 7. P. 25-32.

10 Lepikhin S. A., Galimzyanov M. N., Gimaltdinov I. K. Initiation of detonation waves in channels of variable cross section filled with liquid with combustible gas bubbles // High Temperature. 2010. Т. 48. No. 2. P. 215-221.

11 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. Т. 47. No. 3. P. 424-431.

12 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. Т. 41. No. 3. P. 381.

13 Bayazitova A. R., Gimaltdinov I. K., Shagapov V. Sh. Pressure waves in a tube filled by a bubbled mixture with a nonuniform cross-sectional distribution // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2006. № 3. С. 67.

14 Galimzyanov M. N., Gimaltdinov I. K., Shagapov V. Sh. Two-dimensional pressure waves in a fluid with bubbles // Fluid Dynamics. 2002. Т. 37. No. 2. P. 294-301.

15 Nigmatulin R. I., Shagapov V. Sh., Gimaltdinov I. K., Bayazitova A. R. Propagation of detonation waves along a tubular bubble cluster in liquid // Doklady Physics. 2005. T. 50. No. 8. P. 405-408.

16 Nigmatulin R. I., Shagapov V. Sh., Gimaltdinov I. K., Akhmadulin F. F. Explosion of a bubble curtain with a combustible-gas mixture under the action of a pressure pulse // Doklady Physics. 2003. T. 48. No. 2. P. 75-79.

17 Пинаев А. В., Кочетков И. И. Инициирование объема газа над границей газожидкостной среды волной пузырьковой детонации // ФГВ. 2016. Т. 52, No. 1. P. 96-102.

18 Воронин Д. В. О возбуждении детонации в жидкости с пузырьками химически активного газа // Химическая физика. 2005. Т. 24. No. 9. С. 51-58.

References

1 Sychev A. I. Volna detonacii v sisteme zhidkost' – puzyr'ki gaza // Fizika gorenija i vzryva. 1985. T. 21. No. 3. S. 103-110. [in Russian].

2 Sychev A. I., Pinaev A. V. Samopodderzhivajushhajasja detonacija v zhidkostjah s puzyr'kami vzryvchatogo gaza // PMTF. 1986. No. 1. S. 133-138. [in Russian].

3 Pinaev A. V., Sychev A. I. Struktura i svojstva detonacii v sistemah zhidkost' – puzyr'ki gaza // Fizika gorenija i vzryva. 1986. T. 22. No. 3. S. 109-118. [in Russian].

4 Gimaltdinov I. K., Arslanbekova R. R., Levina T. M. Osobennosti dinamiki postdetonacionnyh voln // Teplofizika i aeromehanika. 2016. T. 23. No. 3. S. 371-384. [in Russian].

5 Gimaltdinov I. K., Kucher A. M. Detonation waves in a multicomponent bubble liquid // High Temperature. 2014. T. 52. No. 3. S. 411-416. [in Russian].

6 Bajazitova Ja. R., Gimaltdinov I. K. O dinamike zvukovyh voln v trubke s jelastichnymi stenkami, zapolnennoj puzyr'kovoj zhidkost'ju // Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Matematika. Mehanika. Fizika. 2014. T. 6. No. 4. S. 13-19. [in Russian].

7 Bayazitova A. R., Gimaltdinov I. K., Kucher A. M., Shagapov V. S. Dynamics of detonation waves in an annular layer of a round pipe // Fluid Dynamics. 2013. T. 48. № 2. S. 201-210. [in Russian].

8 Shagapov V. Sh., Gimaltdinov I. K., Kucher A. M. Detonacionnyye volny v zhidkosti s puzyr'kami, chastichno sostojashhimi iz inertnogo gaza // Vestnik Bashkirskogo universiteta. 2013. T. 18. № 3. S. 630-635. [in Russian].

9 Bayazitova Ya. R., Gimaltdinov I. K., Bayazitova A. R. Features of the dynamics of detonation waves in layered bubble systems // Tyumen State University Herald. 2013. № 7. S. 25-32. [in Russian].

10 Lepikhin S. A., Galimzyanov M. N., Gimaltdinov I. K. Initiation of detonation waves in channels of variable cross section filled with liquid with combustible gas bubbles // High Temperature. 2010. T. 48. № 2. S. 215-221. [in Russian].

11 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. T. 47. № 3. S. 424-431. [in Russian].

12 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. T. 41. № 3. S. 381. [in Russian].

13 Bayazitova A. R., Gimaltdinov I. K., Shagapov V. Sh. Pressure waves in a tube filled by a bubbled mixture with a nonuniform cross-sectional distribution // Izvestija Rossijskoj akademii nauk. Mehanika tverdogo tela. 2006. № 3. S. 67. [in Russian].

14 Galimzyanov M. N., Gimaltdinov I. K., Shagapov V. Sh. Two-dimensional pressure waves in a fluid with bubbles // Fluid Dynamics. 2002. T. 37. № 2. S. 294-301. [in Russian].

15 Nigmatulin R. I., Shagapov V. Sh., Gimaltdinov I. K., Bayazitova A. R. Propagation of detonation waves along a tubular bubble cluster in liquid // Doklady Physics. 2005. T. 50. № 8. S. 405-408. [in Russian].

16 Nigmatulin R. I., Shagapov V. Sh., Gimaltdinov I. K., Akhmadulin F. F. Explosion of a bubble curtain with a combustible-gas mixture under the action of a pressure pulse // Doklady Physics. 2003. T. 48. № 2. S. 75-79. [in Russian].

17 Pinaev A. V., Kochetkov I. I. Inicijiranje ob#ema gaza nad granicej gazozhidkostnoj sredy volnoj puzyr'kovoju detonacii // FGV. 2016. T. 52, №1. S. 96-102. [in Russian].

18 Voronin D. V. O vozbuзhdenii detonacii v zhidkosti s puzyr'kami himicheski aktivnogo gaza // Himicheskaja fizika. 2005. T. 24. № 9. S. 51-58. [in Russian].

Сведения об авторах

About the authors

Гималтдинов И. К., д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Физика», ФГБОУ ВО «УГНТУ», г. Уфа, Российская Федерация.

I. K. Gimaltdinov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of Physics Department, FSBEI HE «USPTU», Ufa, Russian Federation.

e-mail: iljas_g@mail.ru

Столповский М. В., канд. физ.-мат. наук, старший преподаватель кафедры «Физика», ФГБОУ ВО «УГНТУ», г. Уфа, Российская Федерация.

M. V. Stolpovskii, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Lecturer of Physics Department, FSBEI HE «USPTU», Ufa, Russian Federation.

Левина Т. М., канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой общенаучных дисциплин, ФГБОУ ВО «УГНТУ», филиал, г. Салават, Российская Федерация.

T. M. Levina, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Scientific Disciplines Department, FSBEI HE «USPTU», Branch, Salavat, Russian Federation.