

УДК 532.329; 532.2.532

**ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ
ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ В ПУЗЫРЬКОВОЙ ЖИДКОСТИ**

**THE INFLUENCE OF INITIAL PRESSURE ON THE
CHARACTERISTICS OF DETONATION WAVES
IN BUBBLE LIQUIDS**

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

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

**Уфимский государственный нефтяной технический университет,
филиал, г. Салават, Российская Федерация**

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

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

e-mail: iljas_g@mail.ru

Аннотация. Детонационные волны существуют в разнообразных средах. Несмотря на различия в строении и в физико-химических свойствах систем, волны детонации во всех средах обладают общими признаками: детонация – самоподдерживающийся процесс. Данное обстоятельство обусловлено проявлением общего для всех систем свойства – это химически активные среды. Именно наличие энерговыделения в среде обеспечивает возможность существования волн детонации.

Детонация в пузырьковых средах – уникальное явление: волны пузырьковой детонации способны существовать в системах с чрезвычайно

низким энергосодержанием, массовая калорийность химической активной пузырьковой системы на шесть порядков меньше, чем обычных твердых или жидких взрывчатых веществ. При этом детонация в пузырьковых средах, обладая общими для всех детонационных волн признаками, имеет ряд особенностей, проявляющихся в структуре, свойствах и механизме распространения [1-7].

Детонация – диссипативный процесс: возможность распространения детонационных волн обеспечивается энерговыделением в среде. В пузырьковых средах типа «химически неактивная жидкость - пузырьки химически активного газа» вещества, способные к энерговыделению, находятся в газовой фазе (в пузырьках газа). При изменении начального давления среды с заданной объемной концентрацией газовой фазы массовая концентрация газа и, следовательно, энергосодержание системы меняются. Таким образом, начальное давление пузырьковой среды является важным параметром, влияющим на характеристики и на саму возможность существования волн детонации.

Изучение детонационных волн в пузырьковых жидкостях связано с вопросами взрывобезопасности таких систем. Из экспериментов [7] известно, что первоначальное давление существенно влияет на скорость и амплитуду волн пузырьковой детонации. Поэтому необходимо изучение влияния первоначального давления в пузырьковой системе на характеристики (скорость, амплитуда, амплитуда и протяженность первоначального сигнала способного инициировать взрывную волну в пузырьковой жидкости) детонационных волн.

Abstract. Detonation waves exist in a variety of environments. Despite the differences in the structure and physical-chemical properties of systems detonation wave in all environments share common characteristics: detonation – a self-sustaining process. This fact is a manifestation common to all systems, properties are chemically active environment. It is the presence of energy in the environment provides the possibility of the existence of waves of detonation.

Detonation in bubble media is a unique phenomenon: a bubble detonation wave can exist in systems with extremely low energy content, mass the caloric content of chemically active bubble system by six orders of magnitude smaller than conventional solid or liquid explosives. The detonation in bubble environments, possessing common to all of the detonation wave characteristics, has a number of features, manifested in the structure, properties and mechanism of spreading [1-7].

Detonation – dissipative process: the possibility of propagation of detonation waves is provided by the energy deposition in the environment. In bubble media type» chemically inactive liquid–gas bubbles chemically active «substance capable of energy release are in the gas phase (gas bubbles). If you change the initial pressure with a given volume concentration of the gas phase mass concentration of gas and therefore the energy content of the system change. Thus, the initial pressure of the bubble environment is an important parameter affecting characteristics and the possibility of existence of detonation waves.

The study of detonation waves in bubbly liquids related to the issues of explosion safety of such systems. From experiments [7] it is known that the initial pressure significantly affects the speed and amplitude of waves of bubble detonation. Therefore, it is necessary to study the influence of initial pressure in the bubble on the system characteristics (speed, amplitude, amplitude and length of the original signal capable to initiate a blast wave in a bubbly liquid) detonation waves.

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

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

В ряде отраслей промышленности широко распространены движения многофазных систем с физико-химическими превращениями [1].

Особенности таких течений определяются взаимовлиянием гидродинамических, теплофизических, а также физико-химических явлений. Наиболее ярко эффекты многофазности проявляются при распространении волн в таких средах [2–4]. В жидкости с пузырьками, реологические свойства слабо сжимаемой жидкости, являющейся несущей фазой, кардинально меняются при небольшом по объему (а тем более по массе) добавлении газа (пузырьков), являющегося дисперсной фазой. Интересной особенностью пузырьковой жидкости при распространении волн давления является проявление инерции жидкости при изменении объема смеси за счет сжатия или расширения пузырьков. Важным проявлением указанной инерции совместно с поведением газа или пара в пузырьках и сжимаемостью жидкости является то, что волны давления могут иметь осцилляционную структуру. Кроме того, если газ внутри пузырьков не взрывчатый (например, воздух) из-за неравновесного межфазного теплообмена, вязкости и акустической разгрузки волны конечной длительности в пузырьковой жидкости затухают.

Пузырьковая жидкость с горючей смесью газов (вода с пузырьками гремучего газа или смесью углеводородов с кислородом) является взрывчатым веществом (ВВ), в котором при воздействии импульсом давления порядка 10-20 атмосфер может возникать детонационная волна с амплитудой до сотни атмосфер [5–16]. Массовая калорийность такого ВВ на шесть и более порядков ниже, чем обычных твердых, жидких и газообразных ВВ. Такие низкокалорийные ВВ являются эффективным средством для усиления и поддержания волн, а также для кратковременного повышения давления в локальных зонах. Кроме того, в горючих жидкостях, содержащих завесы с паровоздушными пузырьками, резкие толчки при транспортировке могут способствовать образованию детонационных волн, приводящих к аварийным ситуациям.

Одномерные детонационные волны в пузырьковых системах достаточно подробно изучены как экспериментально [5–9], так и

теоретически [10–15]. На данный момент активно ведутся исследования по изучению динамики двумерных нелинейных и детонационных волн [16, 17]. Целью настоящей работы является численное исследование влияния начального давления на динамику волны пузырьковой детонации.

Запишем систему макроскопических уравнений масс, числа пузырьков в единице объема, импульсов для жидкой фазы и давления газа в пузырьках [1]:

$$\begin{aligned} \frac{d\rho_i}{dt} + \rho_i \frac{\partial v}{\partial x} &= 0 \quad (i = l, g), \quad \rho_i = \rho_i^0 \alpha_i, \\ \frac{dn}{dt} + n \frac{\partial v}{\partial x} &= 0, \\ \rho_i^0 \frac{dv}{dt} + \frac{\partial p_l}{\partial x} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{dp_g}{dt} = -\frac{3\gamma p_g}{a} w - \frac{3(\gamma-1)}{a} q, \quad w = \frac{da}{dt}, \quad \frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v \frac{\partial}{\partial x},$$

где a – радиус пузырьков; p_l – давление несущей жидкости; ρ_i^0 – истинная плотность фаз; α_i – объемное содержание фаз; n – концентрация пузырьков; v – скорость; γ – показатель адиабаты для газа; q – интенсивность теплообмена или тепловой поток от газа к жидкости, отнесенный к единице площади межфазной поверхности; w – радиальная скорость пузырьков. Нижними индексами $i=l, g$ отмечены параметры жидкой и газовой фаз.

При описании радиального движения в соответствии с уточнением, приведенным в [18], будем полагать, что $w = w_R + w_A$, где w_R определяется из уравнения Рэлея–Ламба, а w_A определяется из решения задачи о сферической разгрузке на сфере радиуса a в несущей жидкости в акустическом приближении

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

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

Будем считать, что жидкость является акустически сжимаемой, а газ – калорически совершенным

$$p_l = p_0 + C_l^2(\rho_l^0 - \rho_{l0}^0), \quad p_g = \rho_g^0 B T_g, \quad (3)$$

здесь B – приведенная газовая постоянная. Здесь и в дальнейшем индекс 0 внизу относится к начальному невозмущенному состоянию.

Тепловой поток q задается приближенным конечным соотношением:
 [1]

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

$$\text{Nu}_g = \begin{cases} \sqrt{\text{Pe}_g}, & \text{Pe}_g \geq 100 \\ 10, & \text{Pe}_g < 100 \end{cases}, \quad (4)$$

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

где $T_0 = \text{const}$ – температура жидкости; Nu_g и Pe_g – числа Нуссельта и Пекле; k_g – коэффициент температуропроводности газа; c_g и λ_g – теплоемкость и теплопроводность газа.

Будем полагать, что пузырьки наполнены взрывчатой смесью $\text{H}_2 + 2\text{O}_2$, также положим, что при достижении температуры газа внутри пузырьков некоторого критического значения T^* происходит химическая реакция внутри пузырьков и температура мгновенно изменяется на величину ΔT , соответствующую теплотворной способности газа, вследствие чего давление в газе и в жидкости повышается. Физически это соответствует тому, что период индукции химических реакций значительно меньше характерного времени пульсации пузырьков. Как определяются значения T^* и ΔT представлено в [17]. Отметим, что из системы (1) – (4) при $\alpha_g = 0$ следуют уравнения модели для акустически сжимаемой жидкости без пузырьков газа.

Для численного анализа задачи об эволюции детонационных волн в пузырьковой жидкости используем методику, приведенную в [17]. В работе [7] отмечено, что детонация – это автоволновой процесс: характеристики детонационной волны не зависят от условий инициирования и определяются параметрами среды. При этом детонация является самоорганизующимся процессом – структура детонационных волн в пузырьковых средах при варьировании начального давления среды остается качественно идентичной.

На рисунке 1 представлены расчетные осциллограммы давления детонационной волны, радиуса пузырьков и температуры газа внутри пузырьков. Картинке *a*) соответствует $p_0 = 0,1$ МПа, картинке *b*) – $p_0 = 0,01$ МПа; при этом пропорционально p_0 изменялась начальная плотность газа ρ_{g0}^0 и соответственно – коэффициент температуропроводности газа. Для параметров, характеризующих систему принимались следующие значения: $\alpha_g = 1,25$ мм, $\rho_g^{(0)} = 2,9$ кг/м³, $\lambda_g = 2,49 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·К), $\gamma = 1,398$, $c_g = 1,14$ кДж/(кг·К), $T_* = 1000$ К, $\Delta T = 3200$ К, $\alpha_g = 0,01$. Условия инициирования волны задание начальных и граничных условий приведено в [11].

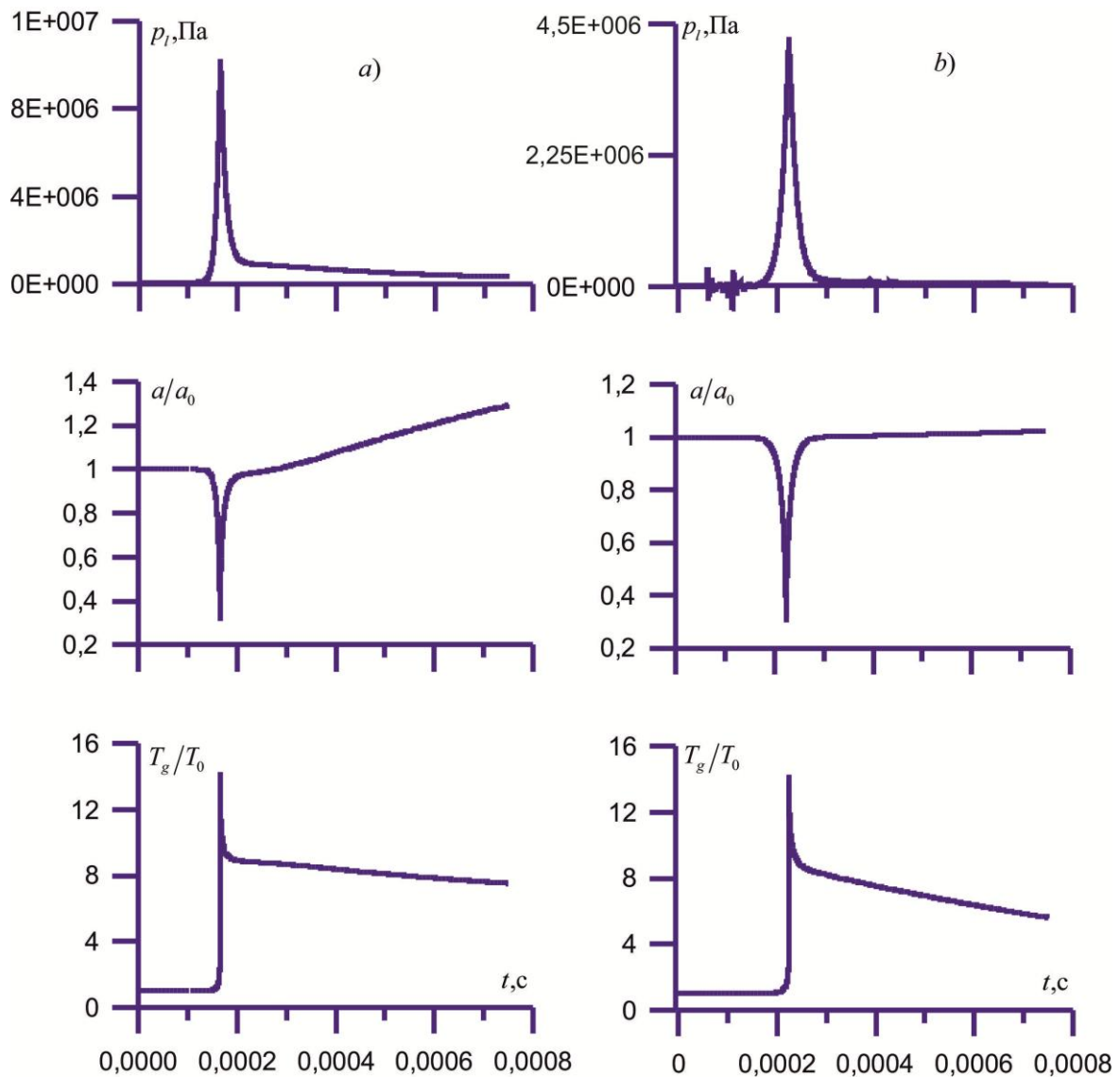


Рисунок 1. Осциллограммы давления детонационной волны, относительного радиуса пузырьков и температуры газа внутри пузырьков

Из рисунка 1 видно, что при уменьшении начального давления системы, параметры детонационной волны остаются идентичными. Детонационные волны – это уединенные волны, давление за которыми стремится к величине, близкой к давлению перед волной. Как видно из осциллограмм давления, уменьшение начального давления системы в 10 раз приводит к уменьшению амплитуды волны приблизительно в 2 раза, при этом относительный радиус пузырьков и относительная температура практически полностью совпадают. Кроме этого, при изменении начального давления не меняется протяженность детонационной волны, она составляет 50–70 мкс. Отметим, что при увеличении начального

давления в 2 раза ($p_0 = 0,2$) приводит к увеличению амплитуды также в 2 раза.

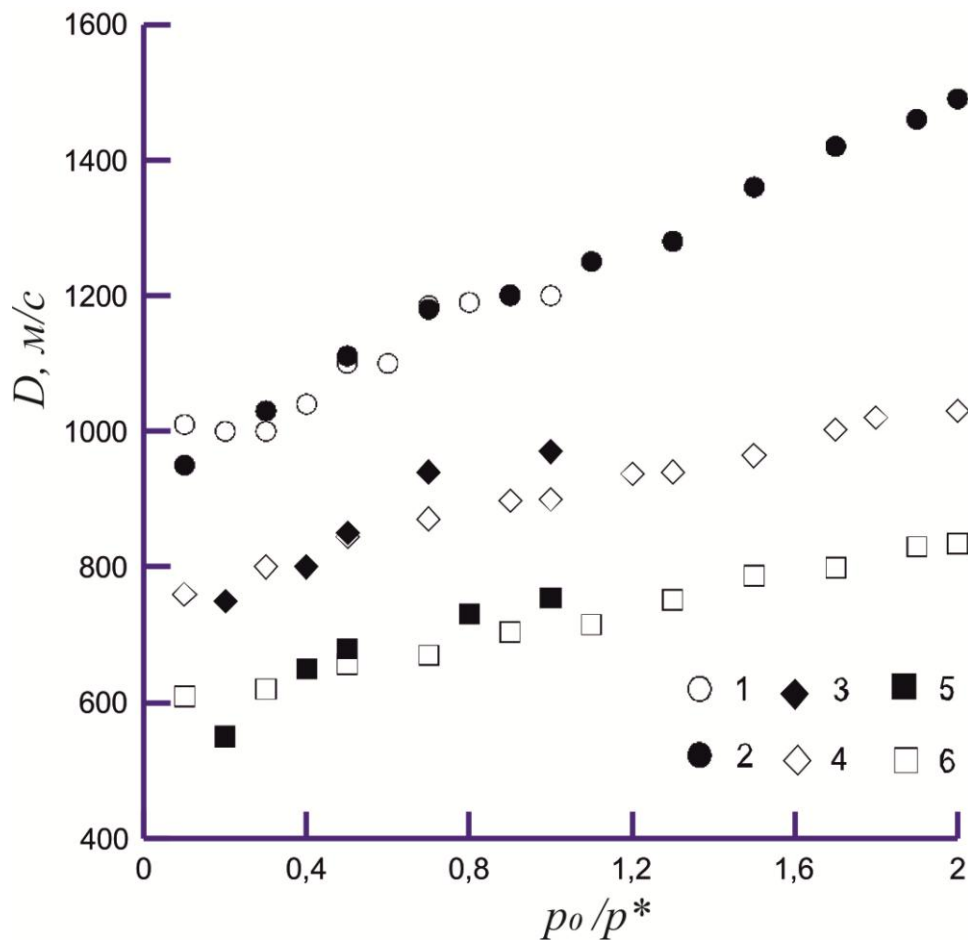


Рисунок 2. Зависимости скорости детонационных волн D от p/p^*
 Точки 1 и 2 соответствуют $\alpha_{g0} = 0,005$; 3 и 4 – $\alpha_{g0} = 0,01$; 5 и 6 – $\alpha_{g0} = 0,02$
 (точки 1, 3, 5 – эксперимент [9]; 2, 4, 6 – расчет)

Как следует из рисунка 2, варьирование начального давления пузырьковой среды оказывает существенное влияние на параметры волны детонации. Так, понижение начального давления пузырьковой среды вызывает уменьшение скорости детонационных волн. Из рисунка 2, что зависимость скорости детонационной волны от p/p^* ($p^* = 0,1$ МПа) близка к линейному закону. При низкой концентрации $\alpha_{g0} = 0,005$ и большом начальном давлении скорость детонации превышает значение 1400 м/с.

Зависимость параметров детонационных волн от начального давления пузырьковых сред обусловлена сопутствующим изменением

энергосодержания системы: при понижении начального давления среды с заданной объемной концентрацией газовой фазы массовая концентрация газа и, следовательно, энергосодержание системы уменьшаются; действие этого параметра оказывается существенным: как следует из рисунка 2, скорость распространения волн детонации падает, а давление снижается.

Выводы

Методом математического моделирования изучены детонационные волны в однокомпонентных пузырьковых средах типа «химически неактивная жидкость – пузырьки химически активного газа»: водно-глицериновые растворы с пузырьками ацетиленокислородной стехиометрической смеси. Исследовано влияние начального давления пузырьковых сред на условия инициирования, структуру, скорость распространения и давление детонационных волн. Показано, что при варьировании начального давления пузырьковой среды структура детонационных волн остается качественно идентичной. С понижением начального давления пузырьковой среды от атмосферного до 0,01 МПа скорость детонационных волн падает примерно в 1,5 раза; при этом давление волн детонации уменьшается примерно в 2 раза, а длительность волн практически не меняется. При увеличении от атмосферного до 0,2 МПа скорость детонационных волн увеличивается, причем для малого объемного содержания пузырьков это увеличение более значительно, чем для большего объемного содержания газа. Зависимость скорости распространения и давления детонационных волн от начального давления пузырьковых сред обусловлена сопутствующим изменением энергосодержания системы. Таким образом, варьирование начального давления пузырьковой среды является эффективным способом управления параметрами волн пузырьковой детонации.

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

Список используемых источников

- 1 Nigmatulin R. I. Dynamics of Multiphase Media: v. 1-2. Hemisphere Publ. Corp New York, United States, 1990. 507p.
- 2 Gubaidullin D., Gafiyatov R. Acoustic waves in bubbly liquids for two kinds of gas bubbles with phase transitions // Journal of Physics: Conference Series. 2014. V. 567, № 1, pp. 1– 4.
- 3 Nigmatulin R. I., Gubaidullin D. A., Nikiforov A. A. Dynamics of pulse waves in bubble liquids: comparison between theory and experiment // Doklady Physics. 2014. V. 59, № 6, pp. 286 - 288.
- 4 Secondary acoustic waves in polydisperse bubbly media / D.V. Voronin, G.N. Sankin, V.S. Teslenko, R. Mettin, W. Lauterborn // J. Appl. Mech. Techn. Physics. 2003. V. 44, № 1, pp. 22-32.
- 5 Hasegawa T., Fujiwara T. Detonation in Oxyhydrogen Bubbled Liquids // Proc. 19th Intern. Symp. on Combustion. Hafia, 1982, pp. 675-683.
- 6 Sychev A. I., Pinaev A. V. Self-supported detonation in liquids with explosive gas bubbles // J. Appl. Mech. Techn. Physics. 1986. № 1, pp. 133-138.
- 7 Сычев А. И. Влияние начального давления пузырьковых сред на характеристики волн детонации // Журнал технической физики. 2015. Т. 85. № 4. С. 126–129.
- 8 Pinaev A.V., Sychev A.I. Influence of physical-chemical properties of gas and a liquid on parameters and a condition of existence of a wave of a detonation in systems a liquid-gas bubbles // Physics of Combustion and Explosion. 1987. V. 23, № 6. pp. 76-84.
- 9 Сычев А. И. Трансформация детонационных волн на границе раздела пузырьковых сред // Журнал технической физики. 2011. Т. 81, № 5. С. 22–27.
- 10 Ljapidevskij V. J. About speed of a bubble detonations // Physics of Combustion and Explosion. 1990. V. 26, № 4, pp. 137-140.

11 Gimaltdinov I. K., Arslanbekova R. R., Levina T. M. Features of the dynamics of postdetonation waves // Thermophysics and Aeromechanics. 2016. V. 23, № 3, pp. 355-367.

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

13 Shagapov V. S., Vahitova N. K. Waves in a bubbly system at presence of chemical reactions in a gas phase // Physics of Combustion and Explosion. 1989. V. 25, № 6, pp. 14-22.

14 Kedrinskij V.K. Hydrodynamics of explosion: experiment and models. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Science Publ., 2000. 435 p.

15 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. V. 21, № 4, pp. 489-498.

16 Zhdan S. A. A detonation of a column of chemically active bubble medium // Physics of Combustion and Explosion. 2003. V. 39, № 4, pp. 107-112.

17 Dynamics of Detonation Waves in an Annular Layer of a Round Pipe / R. Bayazitova, I. K. Gimaltdinov, A. M. Kucher, V. Sh. Shagapov // Fluid Dynamics. 2013. V. 48, № 2, pp. 201–210.

18 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.

References

1 Nigmatulin R. I. Dynamics of Multiphase Media: v. 1-2. Hemisphere Publ. Corp New York, United States, 1990. 507p. [in English].

2 Gubaidullin D., Gafiyatov R. Acoustic waves in bubbly liquids for two kinds of gas bubbles with phase transitions // Journal of Physics: Conference Series. 2014. V. 567, № 1, pp. 1– 4. [in English].

3 Nigmatulin R. I., Gubaidullin D. A., Nikiforov A. A. Dynamics of pulse waves in bubble liquids: comparison between theory and experiment // Doklady Physics. 2014. V. 59, № 6, pp. 286 - 288. [in English].

4 Secondary acoustic waves in polydisperse bubbly media / D.V. Voronin, G.N. Sankin, V.S. Teslenko, R. Mettin, W. Lauterborn // J. Appl. Mech. Techn. Physics. 2003. V. 44, № 1, pp. 22-32. [in English].

5 Hasegawa T., Fujiwara T. Detonation in Oxyhydrogen Bubbled Liquids // Proc. 19th Intern. Symp. on Combustion. Hafia, 1982, pp. 675-683. [in English].

6 Sychev A. I., Pinaev A. V. Self-supported detonation in liquids with explosive gas bubbles // J. Appl. Mech. Techn. Physics. 1986. № 1, pp. 133-138. [in English].

7 Sychev A. I. Vlijanie nachal'nogo davlenija puzыр'kovyh sred na harakteristiki voln detonacii // Zhurnal tehnicheckoj fiziki. 2015. T. 85. № 4. S. 126–129. [in Russian].

8 Pinaev A.V., Sychev A.I. Influence of physical-chemical properties of gas and a liquid on parameters and a condition of existence of a wave of a detonation in systems a liquid-gas bubbles // Physics of Combustion and Explosion. 1987. V. 23, № 6. pp. 76-84. [in English].

9 Sychev A. I. Transformacija detonacionnyh voln na granice razdela puzыр'kovyh sred // Zhurnal tehnicheckoj fiziki. 2011. T. 81, № 5. S. 22–27. [in Russian].

10 Ljapidevskij V. J. About speed of a bubble detonations // Physics of Combustion and Explosion. 1990. V. 26, № 4, pp. 137-140. [in English].

11 Gimaltdinov I. K., Arslanbekova R .R., Levina T. M. Features of the dynamics of postdetonation waves // Thermophysics and Aeromechanics. 2016. V. 23, № 3, pp. 355-367. [in English].

12 Gimaltdinov I. K., Kucher A. M. Detonation waves in a multicomponent bubble liquid // High Temperature. 2014. V. 52, № 3, pp. 411-416. [in English].

13 Shagapov V. S., Vahitova N. K. Waves in a bubbly system at presence of chemical reactions in a gas phase // *Physics of Combustion and Explosion*. 1989. V. 25, № 6, pp. 14-22. [in English].

14 Kedrinskij V.K. Hydrodynamics of explosion: experiment and models. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Science Publ., 2000. 435 p. [in English].

15 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. V. 21, № 4, pp. 489-498. [in English].

16 Zhdan S. A. A detonation of a column of chemically active bubble medium // *Physics of Combustion and Explosion*. 2003. V. 39, № 4, pp. 107-112. [in English].

17 Dynamics of Detonation Waves in an Annular Layer of a Round Pipe / R. Bayazitova, I. K. Gimaltdinov, A. M. Kucher, V. Sh. Shagapov // *Fluid Dynamics*. 2013. V. 48, № 2, pp. 201–210. [in English].

18 Nigmatulin R. I., Shagapov V. Sh., Vahitova N. K. Projavlenie szhimaemosti nesushhej fazy pri rasprostranении voln v puzyr'kovej srede // *DAN SSSR*. 1989. T. 304, № 5. S. 1077–1081. [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 Physico-Mathematical Science, Professor of the Chair «Physics», FSBEI HE «USPTU», Ufa, Russian Federation

e-mail: iljas_g@mail.ru

Левина Т. М., канд. техн. наук, доцент, зав. кафедры «ОНД», ФГБОУ ВО «УГНТУ», филиал, г. Салават, Российская Федерация

T. M. Levina, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Chair «OND», FSBEI HE «USPTU», Branch, Salavat, Russian Federation

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

M. V. Stolpovskii, Candidate of Physico-Mathematical Science, senior lecturer of the Chair «Physics» FSBEI HE «USPTU», Ufa, Russian Federation