

УДК 532.329; 532.2.532

## ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В ПУЗЫРЬКОВОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ГРАНИЦЫ «ВОДОГЛИЦЕРИНОВЫЙ РАСТВОР – МАСЛО»

Гималтдинов Ильяс Кадирович<sup>1</sup>,

iljas\_g@mail.ru

Левина Татьяна Михайловна<sup>1</sup>,

tattin76@mail.ru

<sup>1</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Россия, Республика Башкортостан, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

**Актуальность.** Жидкость с пузырьками горючей смеси газов (вода с пузырьками гремучего газа или смесью углеводородов с кислородом) является взрывчатым веществом, в котором при воздействии импульсом давления порядка 10–20 атм может возникнуть детонационный солитон с амплитудой, достигающей до 100 атм. Удельно-массовая калорийность такого взрывчатого вещества на шесть и более порядков ниже, чем обычных твердых, жидких и газообразных взрывчатых веществ. Подобные низкокалорийные взрывчатые вещества являются эффективным средством для усиления и поддержания волновых сигналов, 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 солитонов, приводящих к аварийным ситуациям. Изучение детонационных волн в пузырьковых жидкостях связано с вопросами взрывобезопасности таких систем. Поэтому необходимо изучение критических параметров (первоначальная амплитуда волны, объемное содержание и дисперсность пузырьков газа), при которых может происходить инициирование детонации.

**Цель исследования:** изучение волнового движения в неоднородной пузырьковой жидкости, когда неоднородность обусловлена наличием границы между различными жидкостями, а также различными объемными содержаниями пузырьков.

**Объект исследования:** пузырьковые жидкости, содержащие взрывчатый газ внутри пузырьков.

**Методика исследования** базируется на численном решении системы дифференциальных уравнений в частных производных.

**Результаты исследования** позволили сделать выводы об особенностях динамики детонационных волн в пузырьковой жидкости, при наличии границы между жидкостями с различающимися акустическими свойствами, и дать рекомендации при разработке требований по взрывобезопасности при транспортировке горючих углеводородов. В работе исследуются особенности динамики волны давления при переходе границы между зонами, заполненными водоглицериновым раствором и маслом. Эти зоны отличаются акустическими свойствами. Кроме того, полагается, что эти жидкости содержат взрывчатые пузырьки. При переходе волны давления типа «ступенька» через границу между зонами из-за различия акустических импедансов происходит увеличение амплитуды волны и может инициироваться детонационная волна. Если объемное содержание пузырьков одинаково в обеих зонах, то очаг взрыва не может инициировать детонационную волну в первой зоне из-за его поджатия волной типа «ступенька». Чтобы детонационная волна распространялась в первой зоне, необходимо, чтобы объемное содержание в первой зоне было больше некоторого критического значения, зависящего от амплитуды первоначальной волны и объемного содержания газа в первой и вторых зонах.

**Ключевые слова:**

Детонация, волна, пузырьки, жидкость, газ.

### Введение

В природе широко распространены движения многофазных систем с физико-химическими превращениями [1]. Особенности таких течений определяются взаимодействием 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 небольшой по объему (а тем более по массе) добавлении газа (пузырьков), являющегося дисперсной фазой. Особенность пузырьковых жидкостей обусловлена их высокой статической сжимаемостью при сохранении высокой массовой плотности, близкой к плотности жидкости, что в свою очередь приводит к малой равновесной скорости звука. Интересной особенностью пузырьковой жидкости в динамических процессах 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 ударные волны могут иметь осцилляционную структуру. В таких средах могут сформироваться возмущения типа уединенной волны, может происходить расслоение возмущений на высокочастотные (упругий предвестник) и на низкочастотные, появление аномально высоких всплесков давления при распространении волн сжатия в парожидкостных смесях. 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 десяти–двадцати 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 паро-воздушными 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 изучение волнового движения в неоднородной пузырьковой жидкости, когда неоднородность обусловлена наличием границы между различными жидкостями, а также различными объемными содержаниями пузырьков.

#### Основные уравнения

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

$$\begin{aligned} \frac{d\rho_i}{dt} + \rho_i \frac{\partial v}{\partial x} &= 0 \quad (i = l, g), \quad \rho_i = \rho_i^0 \alpha_i, \\ \frac{dn}{dt} + n \frac{\partial v}{\partial x} &= 0, \quad \rho_l \frac{dv}{dt} + \frac{\partial p_l}{\partial x} = 0, \\ \frac{dp_g}{dt} &= -\frac{3\gamma p_g}{a} w - \frac{3(\gamma-1)}{a} q, \\ w &= \frac{da}{dt}, \quad \frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v \frac{\partial}{\partial x}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $a$  – радиус пузырьков;  $p_l$  – давление несущей жидкости;  $\rho_i^0$  – истинная плотность фаз;  $\alpha_i$  – объемное содержание фаз;  $n$  – концентрация пузырьков;  $v$  – скорость;  $\gamma$  – 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  $a \frac{dw_R}{dt} + \frac{3}{2} w_R^2 + 4v_l \frac{w_R}{a} = \frac{p_g - p_l}{\rho_l^0}, w_A = \frac{p_g - p_l}{\rho_l^0 C_l \alpha_g^{1/3}},$  (2)

где  $v_l$  – 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

$$\begin{aligned} q &= \text{Nu}_g \lambda_g \frac{T_g - T_0}{2a}, \quad \frac{T_g}{T_0} = \frac{p_g}{p_0} \left( \frac{a}{a_0} \right)^3, \\ \text{Nu}_g &= \begin{cases} \sqrt{\text{Pe}_g}, & \text{Pe}_g \geq 100 \\ 10, & \text{Pe}_g < 100 \end{cases}, \end{aligned} \quad (4)$$

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

где  $T_0 = \text{const}$  – температура жидкости;  $\text{Nu}_g$  и  $\text{Pe}_g$  – числа Нуссельта и Пекле;  $k_g$  – коэффициент теплопроводности газа;  $c_g$  и  $\lambda_g$  – 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  $\Delta T$ , 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  $\Delta T$  представлено в [17].

Отметим, что из системы (1)–(4) при  $\alpha_g = 0$  следуют уравнения модели для акустической сжимаемой жидкости без пузырьков газа.

#### Методика численного расчета

Для численного анализа задачи об эволюции детонационных волн в пузырьковой жидкости удобнее пользоваться системой уравнений (1)–(4), записанной в лагранжевых переменных. В качестве лагранжевой координаты берется эйлерова координата в начальный момент времени. Тогда после некоторых преобразований система уравнений (1)–(4) примет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} &= \frac{1}{J \rho_l^0} \left( -\frac{\partial p_l}{\partial x_0} \right), \quad \frac{\partial x}{\partial t} = v, \\ \frac{\partial p_l}{\partial t} &= \frac{C_l^2 \rho_l^0}{(1 - \alpha_g)} \left( \frac{3\alpha_g w}{a} - \frac{1}{J} \frac{\partial J}{\partial t} \right), \\ \frac{\partial p_g}{\partial t} &= -\frac{3\gamma p_g}{a} w - \frac{3(\gamma-1)}{a} q, \\ \frac{\partial a}{\partial t} &= w = w_R + w_A, \\ a \frac{\partial w_R}{\partial t} + \frac{3}{2} w_R^2 + 4v_l \frac{w_R}{a} &= \frac{p_g - p_l}{\rho_l^0}, \quad w_A = \frac{p_g - p_l}{\rho_l^0 C_l \alpha_g^{1/3}}, \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \alpha_g}{\partial t} = \frac{3\alpha_g}{a} w - \frac{\alpha_g}{J} \frac{\partial J}{\partial t},$$

$$p_l = p_0 + C_1^2(\rho_l^0 - \rho_{l0}^0), \quad p_g = \rho_g^0 B T_g,$$

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

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

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

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

Для аппроксимации дифференциальных уравнений используется равномерная шахматная сетка с узлами в точках  $(x_{i+1/2}, t_{j+1/2})$ :

$$x_{i+1/2} = x_i + 0,5h, \quad i = 0, 1, \dots, N - 1,$$

$$x_0 = 0, \quad x_N = L, \quad t_{j+1/2} = t_j + 0,5\tau, \quad j = 0, 1, 2, \dots$$

где  $h$  – шаг по координате;  $\tau$  – шаг по времени, их значения выбираются из условия Куранта [19]. К целым точкам будем относить параметры эйлеровой координаты  $x$  и скорости  $v$ , а к полужелтым точкам все остальные параметры [19].

#### Результаты расчетов

Вначале рассмотрим процесс перехода волны давления через границу областей, заполненных разными жидкостями. Будем полагать, что первая часть расчетной области ( $0 < x_0 < x_{01}$ ) заполнена минеральным вакуумным маслом ВМ-3, а вторая ( $x_{01} \leq x \leq L$ ,  $L$  – длина рассматриваемой области) – 70%-м водоглицериновым раствором (ВД). Заметим, что пузырьки в обеих областях отсутствуют.

Начальные условия запишутся в виде ( $t=0$ ),  $p_l = p_0, v = 0, \alpha_{g0} = 0$

$$\rho_l^0 = \begin{cases} \rho_{l1}^0, & 0 < x_0 \leq x_{01}, \\ \rho_{l2}^0, & x_{01} < x_0 \leq L, \end{cases} \quad C_l = \begin{cases} C_{l1}, & 0 < x_0 \leq x_{01}, \\ C_{l2}, & x_{01} < x_0 \leq L, \end{cases} \quad (5)$$

здесь  $\rho_{l1}^0, \rho_{l2}^0$  – истинные плотности масла и водоглицеринового раствора;  $C_{l1}, C_{l2}$  – скорости звука в масле и в водоглицериновом растворе.

В момент времени  $t=0$  начинается воздействие граничного давления на границу  $x=0$ , т. е. соответствующее граничное условие для волны типа «ступенька» запишем в виде:

$$p_{l0}(t) = \begin{cases} p_0 + \Delta p_0 \exp \left( - \left( \frac{t - \frac{t_*}{2}}{\frac{t_*}{6}} \right)^2 \right), & 0 < t < \frac{t_*}{2}, \\ p_0 + \Delta p_0, & t \geq \frac{t_*}{2}, \end{cases} \quad (6)$$

где  $\Delta p_0$  – амплитуда давления,  $t_*$  – характерное время, в течение которого волна типа «ступенька» достигает своего максимального значения.

Отметим, что из-за разницы физических характеристик (плотность, скорость звука, вязкость и т. п.) вакуумное масло и водоглицериновый раствор являются жидкостями с различными акустическими свойствами, поэтому при переходе волны давления через границу, разделяющую области масла и водоглицеринового раствора, могут быть разные эффекты.

На рис. 1 представлены эпюры волны давления, реализующиеся при распространении волны типа «ступенька», когда область расчета поделена на зоны, в первой зоне – вакуумное масло, а во второй – водоглицериновый раствор. Из рис. 1 видно, что к моменту 0,2 мс волна типа «ступенька» проходит границу между вакуумным маслом и водоглицериновым раствором. Так как водоглицериновый раствор акустически жестче, чем вакуумное масло ( $\rho_{l2}^0 C_{l2} > \rho_{l1}^0 C_{l1}$ ) [20], то волна от границы  $x=x_{01}$  отражается как от жесткой стенки, при этом видно увеличение амплитуды волны на 2 атм. Отметим также, что скорость распространения волны в первой и во второй областях соответственно равны 1400 и 1660 м/с.

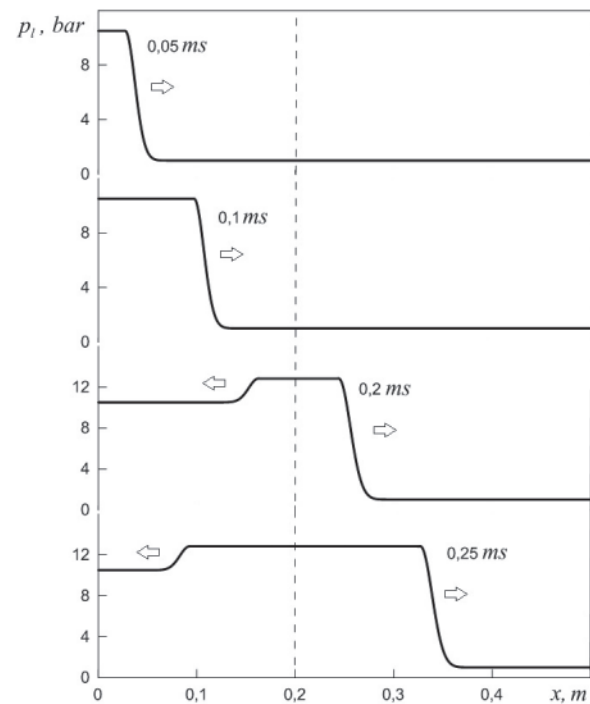


Рис. 1. Распределение давления при переходе волны через границу «вакуумное масло – водоглицериновый раствор», при параметрах  $\rho_{l1}^0=850$  кг/м<sup>3</sup>,  $C_{l1}=1400$  м/с,  $\rho_{l2}^0=1182$  кг/м<sup>3</sup>,  $C_{l2}=1660$  м/с,  $p_0=1$  атм,  $\Delta p_0=9,5$  атм. Цифры у кривых соответствуют моментам времени

Fig. 1. Pressure distribution during the wave transition through the «vacuum oil – water glycerol solution» boundary, at the parameters  $\rho_{l1}^0=850$  kg/m<sup>3</sup>,  $C_{l1}=1400$  m/s,  $\rho_{l2}^0=1182$  kg/m<sup>3</sup>,  $C_{l2}=1660$  m/s,  $p_0=1$  bar,  $\Delta p_0=9,5$  bar. The digits of the curves correspond to the instants of time

Рассмотрим процесс распространения волны давления в пузырьковой жидкости, когда пузырьки заполнены взрывчатым газом  $H_2+2O_2$ , как для случая, представленного на рис. 1. Положим, что

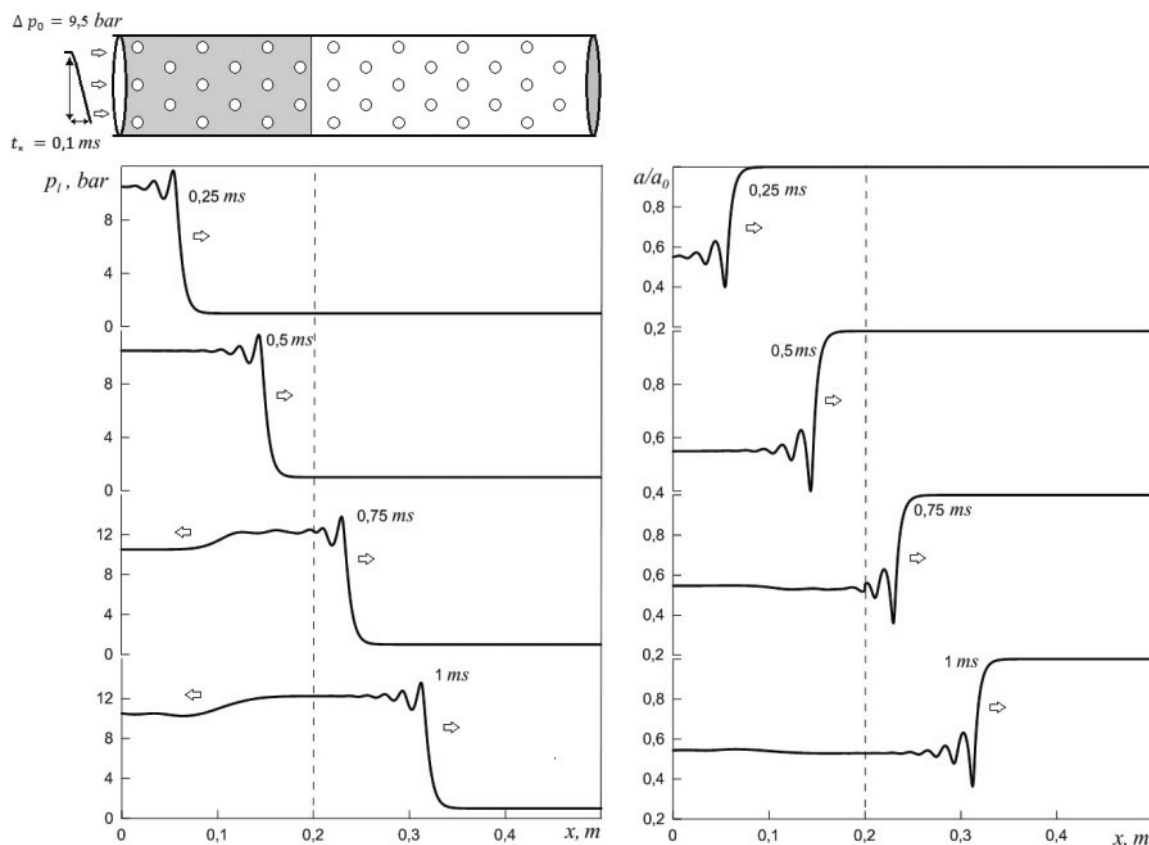
область расчета поделена на две зоны: жидкая фаза пузырьковой системы в первой зоне ( $0 \leq x_0 \leq x_{01}$ ) является вакуумным маслом, во второй зоне ( $x_{01} < x_0 \leq L$ ) – водоглицериновым раствором. Начальные условия (5) в этом случае дополняются следующими выражениями: ( $t=0$ ),  $p_g=p_0$ ,  $T_g=T_0$ ,  $\rho_g^0=\rho_{g0}^0$ ,  $\alpha_g=\alpha_{g0}$ ,  $w=0$ ,  $w_A=0$ ,  $w_R=0$ .

На рис. 1 показано, что при прохождении волны границы, где скачком изменяются свойства жидкости, происходит изменение амплитуды волны. Исследуем, может ли наличие такой границы привести к инициированию детонации в системе.

На рис. 2 представлено распределение давления и относительного радиуса пузырьков при распространении волны типа «ступенька», инициируемого воздействием жесткого поршня на границу  $x_0=0$ , согласно выражению (6). Для результатов, представленных на рис. 2, видно, что амплитуда первоначальной волны не способна инициировать детонацию и волна после отражения от границы  $x=x_{01}$  в обеих зонах распространяется как нелинейная волна в пузырьковой жидкости. При переходе через границу  $x_{01}$ , разделяющую области вакуумного масла и водоглицеринового раствора, происходит увеличение амплитуды волны. Отметим, что отра-

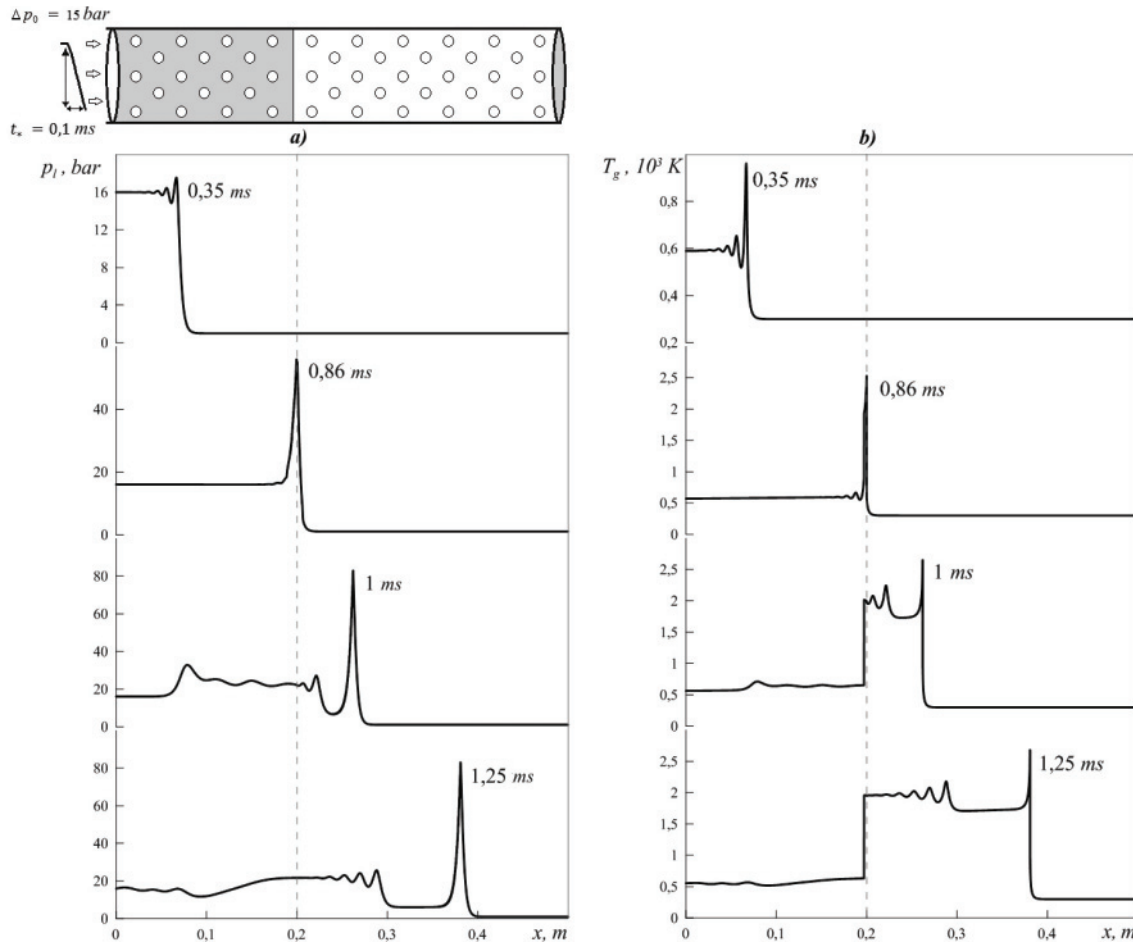
женная волна, распространяющаяся от границы  $x_{01}$  справа налево, не имеет осцилляционную структуру, так как распространяется в поджатой среде, передний фронт волны при этом выравнивается.

На рис. 3 представлены эпюры давления (а) и температура газа (б) в пузырьках для различных моментов времени при распространении волны типа «ступенька», инициируемой воздействием жесткого поршня на границу  $x_0=0$ , согласно выражению (6). Видно, что при отражении от границы  $x_{01}$  амплитуда волны увеличивается и, как видно из фрагментов, соответствующих моменту 0,86 мс, инициируется очаг взрыва, т. е. для пузырьков, находящихся вблизи границы  $x_{01}$ , достигается температура воспламенения  $T^*$ . Как видно из картинок, соответствующих моментам времени 1 и 1,25 мс, во второй зоне распространяется детонационная волна амплитудой более 80 атм, температура газа в пузырьках в момент взрыва достигает значения 2661 К. Также видно, что детонационный процесс не распространяется в первой зоне. Это происходит из-за того, что первая зона уже «поджата» первоначальной ударной волной. Этот эффект согласуется с результатами, представленными в работе [7], в которой отмечается уве-



**Рис. 2.** Динамика волны в пузырьковой жидкости при прохождении границы «масло – водоглицериновый раствор». Параметры расчета:  $a_0=1$  мм,  $\rho_{g0}^0=2,9$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda_g=2,49 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м·К),  $\gamma=1,398$ ,  $c_g=1,14 \cdot 10^3$  Дж/кг·К,  $T_0=1000$  К,  $\Delta T=1661$  К,  $\alpha_{g0}=0,01$ . Остальные параметры такие же, как для рис. 1

**Fig. 2.** Dynamics of a wave in a bubble liquid while passing the «oil – water-glycerine solution» boundary. Calculation parameters:  $a_0=1$  mm,  $\rho_{g0}^0=2,9$  kg/m<sup>3</sup>,  $\lambda_g=2,49 \cdot 10^{-2}$  W/(m·K),  $\gamma=1,398$ ,  $c_g=1,14 \cdot 10^3$  J/kg·K,  $T_0=1000$  K,  $\Delta T=1661$  K,  $\alpha_{g0}=0,01$ . The remaining parameters are the same as for Fig. 1



**Рис. 3.** Распределение амплитуды давления в пузырьковой жидкости и температуры газа в различные моменты времени. Параметры расчета:  $\alpha_g=0,03$ ,  $\Delta p_0=15$  bar. Остальные параметры такие же, как для рис. 2

**Fig. 3.** Distribution of pressure amplitude in the bubble liquid and gas temperature at different instants of time. Calculation parameters:  $\alpha_g=0,03$ ,  $\Delta p_0=15$  bar. The other parameters are the same as for Fig. 2

личение амплитудного диапазона, способного инициировать детонацию при увеличении первоначального равновесного давления в пузырьковой смеси. Отметим также, что из эюр, соответствующих моментам 1 и 1,25 мс, видно, что в зоне  $x_0 > x_{01}$  за детонационным солитоном распространяется волна сжатия с характерными осцилляциями давления на фронте, а в зоне  $x_0 \leq x_{01}$  распространяется волна в поджатой среде, которая к моменту 1,25 мс отражается от границы  $x_0=0$  и движется слева направо.

На рис. 4 представлено то же, что на рис. 2, но объемное содержание пузырьков в первой зоне  $\alpha_{g0}^{(1)}$  больше, чем объемное содержание газа во второй зоне  $\alpha_{g0}^{(2)}$ , т. е. в этом случае первая зона ( $0 < x_0 \leq x_{01}$ ) акустически мягче, чем вторая зона ( $x_{01} < x_0 \leq L$ ) не только из-за характеристик жидкой фазы, но и из-за различия объемного содержания газа. Из рис. 4 видно, что на границе  $x_{01}$  происходит отражение и увеличение амплитуды волны. Также видно, что и в первой и во второй зоне инициируются детонационные волны. В первой ( $0 < x_0 \leq x_{01}$ ) зоне детонационная волна амплитудой  $\Delta p \approx 200$  атм распро-

страняется от границы  $x_{01}$  справа налево. А во второй зоне ( $x_{01} < x_0 \leq L$ ) слева направо с амплитудой  $\sim 60$  атм. Отметим, что во второй зоне детонационный солитон не может «отделиться» от волны типа «ступенька».

Таким образом, увеличение объемного содержания пузырьков, т. е. увеличение сжимаемости в первой зоне, приводит к устойчивости детонационной волны в этой зоне.

На рис. 5 представлена карта возможных ситуаций возникновения устойчивой детонационной волны на границе между зонами, имеющими разные объемные содержания. По оси абсцисс отложены значения для объемного содержания газа в первой зоне, по оси ординат – амплитуда начального импульса.

Линии I, II и III соответствуют объемному содержанию пузырьков газа во второй зоне  $\alpha_{g0}^{(2)}=0,005$ ,  $\alpha_{g0}^{(2)}=0,01$  и  $\alpha_{g0}^{(2)}=0,02$  соответственно. Ниже каждой линии лежит область параметров ( $\Delta p_0$ ,  $\alpha_{g0}^{(1)}$ ), при которых на границе между зонами возникает устойчивая детонация в обеих зонах, выше линии – детонационные волны не инициируются.

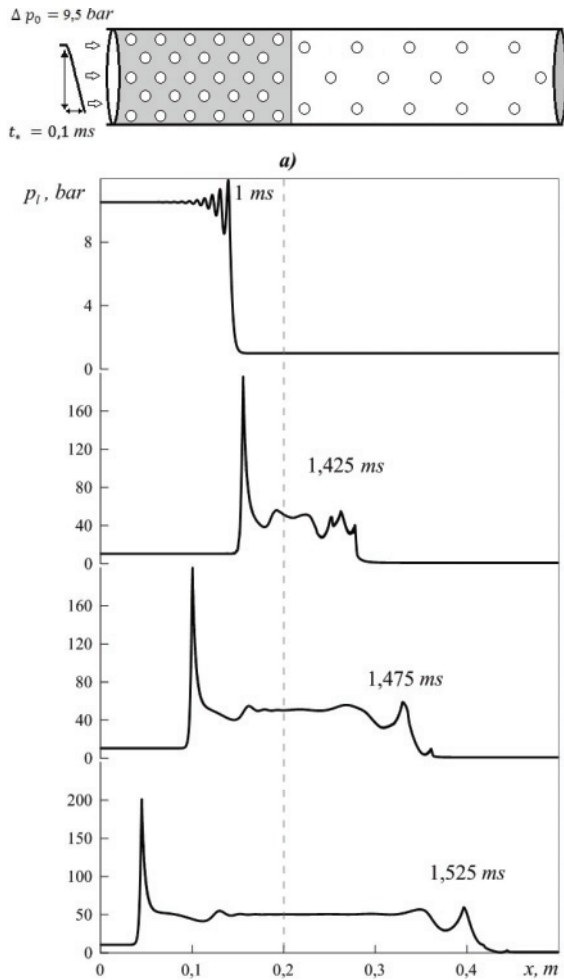


Рис. 4. То же, что на рис. 2, но  $\alpha_{g0}^{(1)}=0,06$ ,  $\alpha_{g0}^{(2)}=0,001$ . Остальные параметры такие же, как для рис. 2

Fig. 4. The same as in Fig. 2, but  $\alpha_{g0}^{(1)}=0,06$ ,  $\alpha_{g0}^{(2)}=0,001$ . The other parameters are the same as for Fig. 2

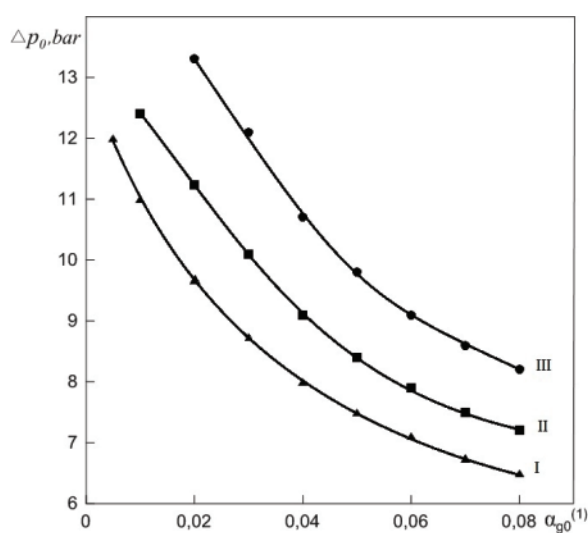
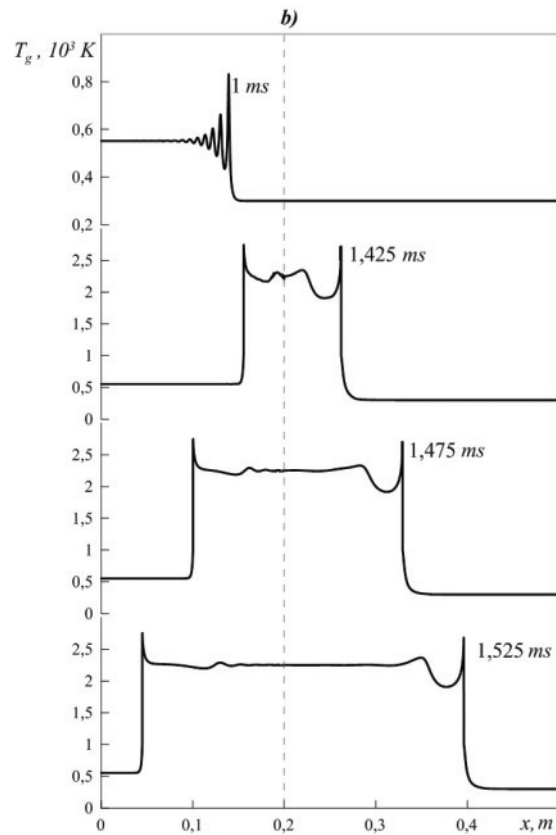


Рис. 5. Карта возможных ситуаций возникновения и распространения взрыва на границе между областями. Линии I, II и III соответствуют объемному содержанию пузырьков газа во второй зоне  $\alpha_{g0}^{(2)}=0,005$ ,  $\alpha_{g0}^{(2)}=0,01$  и  $\alpha_{g0}^{(2)}=0,02$  соответственно. Остальные параметры такие же, как для рис. 4

Fig. 5. Map of possible situations of explosion occurrence and spread on the border between the regions. Lines I, II and III correspond to the volume content of gas bubbles in the second zone  $\alpha_{g0}^{(2)}=0,005$ ,  $\alpha_{g0}^{(2)}=0,01$  and  $\alpha_{g0}^{(2)}=0,02$  respectively. The remaining parameters are the same as for Fig. 4

### Заключение

Исследована динамика волн давления в неоднородной пузырьковой жидкости, когда неоднородность обусловлена наличием границы между жид-

костями с разными акустическими свойствами: в первой области жидкой фазой является вакуумное масло – ВМЗ, а во второй – водоглицериновый раствор.

Установлено, что при переходе волны давления типа «ступенька» через границу «масло – водоглицериновый раствор» из-за того, что акустический импеданс водоглицеринового раствора больше, чем у масла, происходит увеличение амплитуды волны и может инициироваться детонационная волна. Если объемное содержание пузырьков оди-

наково в обеих областях, то очаг взрыва не может инициировать детонационную волну в области, заполненной маслом, из-за поджатия волной типа «ступенька». Чтобы детонационная волна инициировалась и распространялась в области, заполненной маслом, необходимо, чтобы объемное со-

держание газа в этой области было больше некоторого критического значения, зависящего от амплитуды первоначальной волны и объемного содержания газа в обеих областях.

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nigmatulin R. I. Dynamics of Multiphase Media: V. 1–2. – New York, United States: Hemisphere Publ. Corp., 1990. – 507 p.
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. – P. 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. – P. 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. – P. 22–32.
5. Hasegawa T., Fujiwara T. Detonation in Oxyhydrogen Bubbled Liquids // Proc. 19<sup>th</sup> Intern. Symp. on Combustion. – Hafnia, 1982. – P. 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. – P. 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. – P. 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. – P. 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. – P. 355–367.
12. Gimaltdinov I.K., Kucher A.M. Detonation waves in a multicomponent bubble liquid // High Temperature. – 2014. – V. 52. – № 3. – P. 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. – P. 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. – P. 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. – P. 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. – P. 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.
19. Самарский А.А., Попов Ю.П. Разностные схемы газовой динамики. – М.: Наука, 1975. – 352 с.
20. Исакович М.А. Общая акустика. – М.: Наука, 1973. – 496 с.

*Поступила 16.06.2017 г.*

#### Информация об авторах

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

**Левина Т.М.**, кандидат технических наук, заведующий кафедрой общетехнических дисциплин Уфимского государственного нефтяного технического университета

UDC 532.329; 532.2.532

## FEATURES OF DETONATION WAVE DYNAMICS IN BUBBLY LIQUID ON THE BORDER «HYDROGLYCERIC SOLUTION – OIL»

Ilias K. Gimaltdinov<sup>1</sup>,

iljas\_g@mail.ru

Tatyana M. Levina<sup>1</sup>,

tattin76@mail.ru

<sup>1</sup> Ufa State Petroleum Technological University,  
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, Russia.

**Relevance.** Liquid with bubbles of a combustible mixture of gases (water with bubbles of explosive gas or a mixture of hydrocarbons with oxygen) is an explosive in which a detonation soliton with an amplitude up to 100 atm can appear when a pressure pulse of the order of 10–20 atm is applied. The specific gravity of this explosive is six orders of magnitude or more lower than that of conventional solid, liquid, and gaseous explosives. Such low-calorie explosives are an effective means for amplifying and maintaining wave signals, as well as for short-term pressure increase in local zones. In addition, in flammable liquids containing veils with vapor-air bubbles, sudden shocks during transportation can contribute to the formation of detonation solitons leading to emergency situations. The study of detonation waves in bubble liquids is related to the questions of the explosion safety of such systems. Therefore, it is necessary to study the critical parameters (initial wave amplitude, volume content and dispersity of gas bubbles) at which detonation initiation can occur.

**The aim** of the research is to study the wave motion in inhomogeneous bubbly fluid, where the inhomogeneity is caused by the presence of a boundary between different liquids, as well as different bulk contents of bubbles.

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

**The research method** is based on numerical solutions of a system of partial differential equations.

**The results** of the study made it possible to draw conclusions about the features of the dynamics of detonation waves in a bubble liquid, in the presence of a boundary between liquids with differing acoustic properties, and to give recommendations when developing requirements for explosion safety in the transport of combustible hydrocarbons. These zones differ in acoustic properties. In addition, it is believed that these fluids contain explosive vesicles. When a pressure wave of the «step» type passes through the boundary between the zones, because of the difference in the acoustic impedances, the amplitude of the wave increases and a detonation wave can be initiated. If the volume content of bubbles is the same in both zones, then the source of the explosion can not initiate a detonation wave in the first zone due to its compression by a wave of the «step» type. In order for the detonation wave to propagate in the first zone, the volume content in the first zone should be greater than a certain critical value, depending on the amplitude of the initial wave and the gas volume content in the first and second zones.

### Key words:

Detonation, wave, bubbles, liquid, gas.

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

### REFERENCES

- Nigmatulin R. I. *Dynamics of Multiphase Media: vol. 1–2*. New York, United States, Hemisphere Publ. Corp., 1990. 507 p.
- Gubaidullin D., Gafiyatov R. Acoustic waves in bubbly liquids for two kinds of gas bubbles with phase transitions. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014. vol. 567, no. 1, pp.1–4.
- Nigmatulin R.I., Gubaidullin D.A., Nikiforov A.A. Dynamics of pulse waves in bubble liquids: comparison between theory and experiment. *Doklady Physics*, 2014, vol. 59, no. 6, pp. 286–288.
- Voronin D.V., Sankin G.N., Teslenko V.S., Mettin R., Lauterborn W. Secondary acoustic waves in polydisperse bubbly media. *J. Appl. Mech. Techn. Physics*, 2003, vol. 44, no. 1, pp. 22–32.
- Hasegawa T., Fujiwara T. Detonation in Oxyhydrogen Bubbled Liquids. Proc. 19<sup>th</sup> Intern. Symp. on Combustion. Hafnia, 1982. pp. 675–683.
- Sychev A.I., Pinaev A.V. Self-supported detonation in liquids with explosive gas bubbles. *J. Appl. Mech. Techn. Physics*, 1986, no. 1, pp. 133–138.
- Sychev A.I. Vliyaniye nachalnogo davleniya puzyrkovykh sred na kharakteristiki voln detonatsii [Influence of initial pressure in bubble media on detonation wave parameters]. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2015, vol. 60, no. 4, pp. 603–606.
- 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, vol. 23, no. 6, pp. 76–84.
- Sychev A.I. Transformatsiya detonatsionnykh voln na granitse razdela puzyrkovykh sred [Transformation of detonation waves at the interface between bubble media]. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2011, vol. 56, no. 5, pp. 611–615.
- Ljapidevskij V.J. About speed of bubble detonations. *Physics of Combustion and Explosion*, 1990, vol. 26, no. 4, pp. 137–140.
- Gimaltdinov I.K., Arslanbekova R.R., Levina T.M. Features of the dynamics of postdetonation waves. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2016, vol. 23, no. 3, pp. 355–367.
- Gimaltdinov I.K., Kucher A.M. Detonation waves in a multicomponent bubble liquid. *High Temperature*, 2014, vol. 52, no. 3, pp. 411–416.
- 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, vol. 25, no. 6, pp. 14–22.
- Kedrinskij V.K. *Hydrodynamics of explosion: experiment and models*. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Science Publ., 2000. 435 p.
- 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.
- Zhdan S.A. A detonation of a column of chemically active bubble



- medium. *Physics of Combustion and Explosion*, 2003, vol. 39, no. 4, pp. 107–112.
17. Bayazitova A.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.
18. Nigmatulin R.I., Shagapov V.Sh., Vakhitova N.K. Proyavleniye szhimaemosti nesushchey fazy pri rasprostraneni voln v puzyrkovoy srede [Statement of compressibility of carrier liquid in wave distribution in bubbling environment]. *Soviet Physics. Doklady*, 1989, vol. 34, no. 2, pp. 98–102.
19. Samarskiy A.A., Popov Yu.P. *Raznostnye skhemy gazovoy dinamiki* [Difference schemes of gas dynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 352 p.
20. Isakovich M.A. *Obshchaya akustika* [General acoustics]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 496 p.

*Received: 16 June 2017.*

#### **Information about the authors**

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

**Tatyana M. Levina**, Cand. Sc., head of the department, Ufa State Petroleum Technological University.