

© Я.Р. БАЯЗИТОВА, И.К. ГИМАЛТДИНОВ, А.Р. БАЯЗИТОВА

yana.bayazitova@mail.ru

УДК 532.529.5

### **ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В СЛОИСТО-НЕОДНОРОДНЫХ ПУЗЫРЬКОВЫХ СИСТЕМАХ**

*АННОТАЦИЯ.* Исследована эволюция детонационных волн в вертикальном кольцевом слое, заполненном газожидкостной средой, при различном объемном содержании пузырьков и различном способе инициирования детонации. Определено влияние первоначального воздействия на различные участки торца трубы и концентрации пузырьковой смеси на процесс формирования детонационных волн и динамику их распространения. Установлен срыв детонационной волны в случае объемного содержания пузырьков 1% при воздействии жестким ударником по пузырьковой области и внешнему кольцу «чистой» жидкости, изложены причины его возникновения. Рассмотрен механизм инициирования детонационной волны. Описан механизм инициирования солитона в случае концентрации пузырьков 3-4% при воздействии жестким ударником по торцу кольцевого слоя и внешнему слою «чистой» жидкости, показано его отличие от других рассматриваемых случаев. Исследовано влияние способа первоначального воздействия и объемного содержания пузырьков на момент возникновения детонации.

*SUMMARY.* The evolution of detonation waves in the vertical annular layer filled with a gas-liquid medium, with different bubble holdup and different ways of detonation initiation is investigated. The effects of the initial exposure to different parts of the pipe end and concentration of bubbly mixture on the formation of detonation waves and the dynamics of their distribution, have been determined. It has been discovered that in case the bubble holdup is 1% and the bubble area and the external ring of the pure liquid are exposed to a hard knocker there is a detonation wave breakdown; the reasons for this phenomenon are given. The initiation mechanism of the detonation wave is considered. The initiation mechanism of the solitary matter wave when the bubble holdup is 3-4%, and the end of the annular layer and external layer of the pure liquid are exposed to a hard knocker has been described and its peculiar features against the other background have been given. The effect of the initial exposure method and bubble holdup at the moment of detonation has been investigated.

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА.* Детонационная волна, инициирование, пузырьковая среда, неоднородность, фоновая волна.

*KEY WORDS.* Detonation wave, initiation, bubble medium, heterogeneity, background wave.

Рассмотрим двумерные осесимметричные волновые возмущения в заполненной жидкостью трубе, содержащей кольцевой пузырьковый слой, ограниченный цилиндрическими поверхностями с образующими параллельными оси  $z$ .

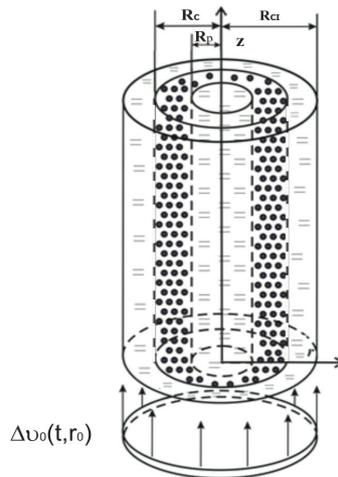


Рис. 1. Схема задачи: цилиндрический кольцевой пузырьковый слой, заключенный в слои «чистой» жидкости

На рис. 1 представлено схематическое изображение газожидкостной системы, которое иллюстрирует трубу радиуса  $R_c$  с зоной однородной пузырьковой смеси с радиусом  $\Delta R = R_c - R_p$ , окруженной цилиндрическими слоями «чистой» жидкости. Считаем, что газ в пузырьках взрывчатый (например, смесь ацетилена с кислородом). Возмущения в системе возникают из-за удара по торцу трубы.

Для описания волнового движения, запишем систему макроскопических уравнений сохранения масс, числа пузырьков, импульсов и давления в пузырьках в цилиндрической системе координат [1, 2]:

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

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

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

$$w = \frac{da}{dt}, \quad \left( \frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v_r \frac{\partial}{\partial r} + v_z \frac{\partial}{\partial z} \right), \quad \alpha_l + \alpha_g = 1, \quad \rho_i = \rho_i^0 \alpha_i, \quad \alpha_g = \frac{4}{3} \pi a^3$$

$$\rho = \rho_g + \rho_l,$$

где  $a$  — радиус пузырьков,  $\gamma$  — показатель адиабаты для газа,  $p_i$  — давление фаз,  $\rho_i$  — истинные плотности фаз,  $\alpha_i$  — объемные содержания фаз,  $q$  — интенсивность теплообмена,  $n$  — число пузырьков в единице объема,  $w_i$  — радиальная скорость пузырьков. Скорости  $v_z$  и  $v_r$  соответствуют движению по координатам  $z$  и  $r$ . Нижними индексами  $i = l, g$  отмечены параметры жидкости и газа.

Радиальное движение описывается следующими уравнениями [3]:

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

где  $C_l$  — скорость звука в жидкости,  $\nu_l$  — вязкость жидкости.

Будем полагать, что жидкость является акустически сжимаемой, а газ калорически совершенным [4]:

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

где  $R$  — газовая постоянная.

Здесь и в дальнейшем индексами 0 внизу снабжены параметры, относящиеся к начальному невозмущенному состоянию.

Тепловой поток  $q$  задается приближенным конечным соотношением [5]:

$$q = \text{Nu} \lambda_g \frac{T_g - T_0}{2a}.$$

Число Нуссельта определяется из условия [6]:  $\text{Nu} = \begin{cases} \sqrt{\text{Pe}}, & \text{Pe} > 100 \\ 10 & \end{cases}$ ,

где  $\text{Pe} = 12(\gamma - 1) \frac{T_0}{|T_g - T_0|} \frac{a|w|}{k_g}$ ,  $k_g = \frac{\lambda_g}{c_g \rho_{g0}}$ .

Температура газа и давление газа в пузырьке задается уравнениями [7]:

$$\frac{T_g}{T_0} = \frac{p_g}{p_0} \left( \frac{a}{a_0} \right)^3, \quad \frac{dp_g}{dt} = -\frac{3\gamma p_g}{a} w - \frac{3(\gamma - 1)}{a} q.$$

Для проведения численных экспериментов примем следующие начальные и граничные условия при  $t = 0$ ,  $z > 0$ , соответствующие исходному состоянию покоя пузырьковой смеси в трубе:

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

$$R_p < r_0 < R_c : \alpha_g = \alpha_{g0}, \quad \rho = \rho_{l0}^0 (1 - \alpha_{g0}) + \alpha_{g0} \rho_{g0}^0, \quad p_g = p_0, \quad a = a_0, \quad w = 0$$

$$0 < r_0 < R_p, R_c < r_0 < R_{cl} : \alpha_{g0} = 0, \quad \rho_l = \rho_{l0}^0$$

На оси симметрии  $r_0 = 0$  и стенке трубы  $r_0 = R_c$  принимаются условия непротекания жидкости  $v_r = 0$  [8].

Для инициирования волны в системе на границе  $z = 0$  воздействует жесткий ударник по закону [9]:

$$v_0(t, r_0) = \begin{cases} \Delta v_0 \exp\left(-\left(\frac{t - t_*/2}{t_*/6}\right)^2\right), & 0 < t < t_* \\ 0, & t > t_* \end{cases} \quad (1)$$

где  $v_0$  — амплитуда скорости,  $t_*$  — характерная протяженность импульса.

Методика численного расчета представлена в [10].

Численные эксперименты проводились при следующих геометрических и теплофизических параметрах системы:  $a_g^{(0)} = 1.5 \text{ мм}$ , газ — смесь ацетилена и кислорода ( $C_2H_5 + 2,5 O_2$ ):  $\rho_{g0}^0 = 1.3 \text{ кг/м}^3$ ,  $\gamma_0 = 1.35$ ,  $\lambda_g = 2.51 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/(м} \cdot \text{с} \cdot \text{град)}$ ,  $c_g = 1.14 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{град)}$ ,  $T_* = 1000 \text{ К}$ ,  $\Delta T = 3000 \text{ К}$ ; жидкость — смесь глицерина с водой:

$$\rho_{l0}^0 = 1130 \text{ кг/м}^3, \nu_l = 0.6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}, C_l = 1700 \text{ м/с}; p_0 = 10^5 \text{ Па}, T_0 = 293 \text{ К}.$$

На рисунках 2-4 указатели 1 и 2 соответствуют областям пузырьковой смеси и «чистой» жидкости.

На рис. 2 представлена динамика распространения волн в момент времени 0.5 мс для случая объемного содержания пузырьковой смеси  $\alpha = 1\%$  при различных способах иницирования: на рис. 2а показан удар по всему торцу трубы, на рис. 2б удар по пузырьковому кольцу. Видно, что в обоих случаях в пузырьковом кольце инициируется детонационная волна. В случае на рис. 2а во всех слоях: и в области пузырькового кольца, и в области «чистой» жидкости образуются волны значительной амплитуды. Если удар производится только по кольцевому пузырьковому слою (рис. 2б), то фоновые волны в области «чистой» жидкости почти незаметны.

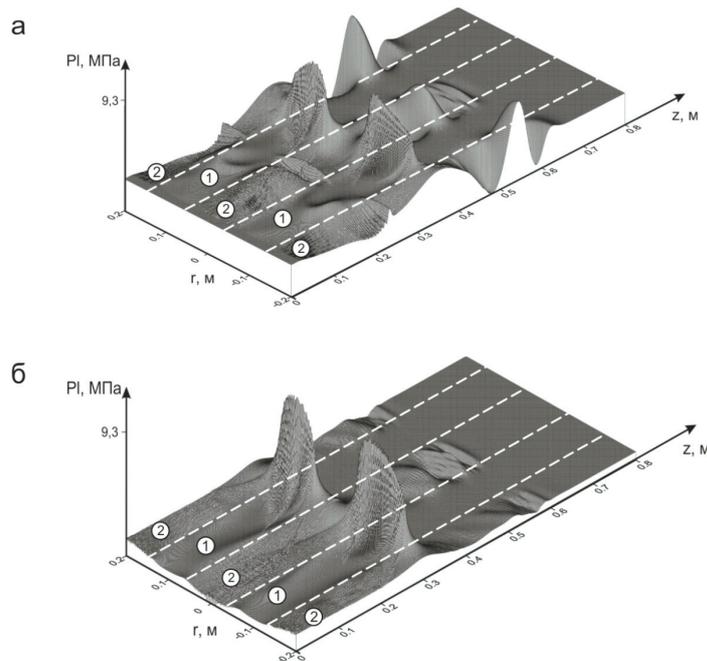


Рис. 2. Эпюры давления в момент времени 0.5 мс для различных способов инициализации волновых возмущений

Воздействие жестким ударником на различные участки торца трубы ударной волны влияет на момент воспламенения газожидкостной смеси. При единой для всех случаев объемной доле пузырьков воспламенение возникает быстрее при

ударе по торцу, чуть позже — при одновременном ударе по пузырьковому кольцу и внешнему кольцу «чистой» жидкости, в последнюю очередь — при ударе по кольцу. Отметим, что при увеличении объемной концентрации пузырьков для формирования детонационной волны требуется больше времени.

На рис. 3. представлены области воспламенения для различных способов инициирования первоначального импульса и объемном содержании пузырьков 0.01. Рис. 3а соответствует случаю, когда на границе  $z = 0$  жесткий ударник по закону (1) действует по всему сечению трубы; рис. 3б — случаю, когда на границе  $z = 0$  жесткий ударник действует по кольцевому пузырьковому слою; рис. 3в — случаю, когда на границе  $z = 0$  жесткий ударник по закону (1) одновременно воздействует по пузырьковой области и внешнему кольцу «чистой» жидкости. Из рис. 3в видно, что в случае первоначального воздействия ударником одновременно по пузырьковому кольцу и кольцу «чистой» жидкости в силу поджатия волной с внешнего слоя «чистой» жидкости в пузырьковой области остаются участки, сужающие область воспламенения в поперечном направлении, тем самым ослабляя детонационную волну и препятствуя ее дальнейшему распространению. В итоге детонационный солитон срывается.

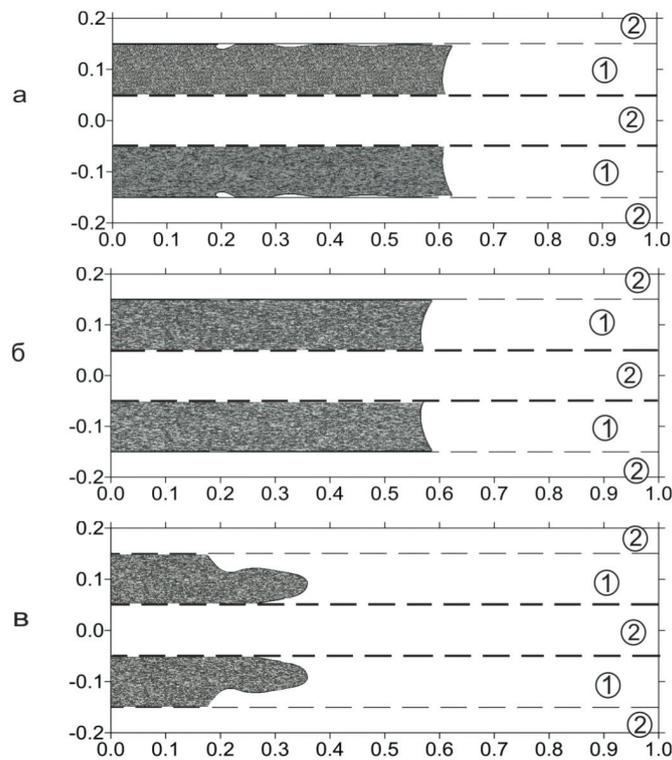


Рис. 3. Области воспламенения в момент времени 0.73 мс для различных способов первоначального воздействия на систему

На рис. 4. представлена динамика распространения волн и соответствующая область сгорания в пузырьковой области при воздействии ударником по торцу кольцевого пузырькового слоя и внешнему слою «чистой» жидкости. Концентрация пузырьков составляет 3%.

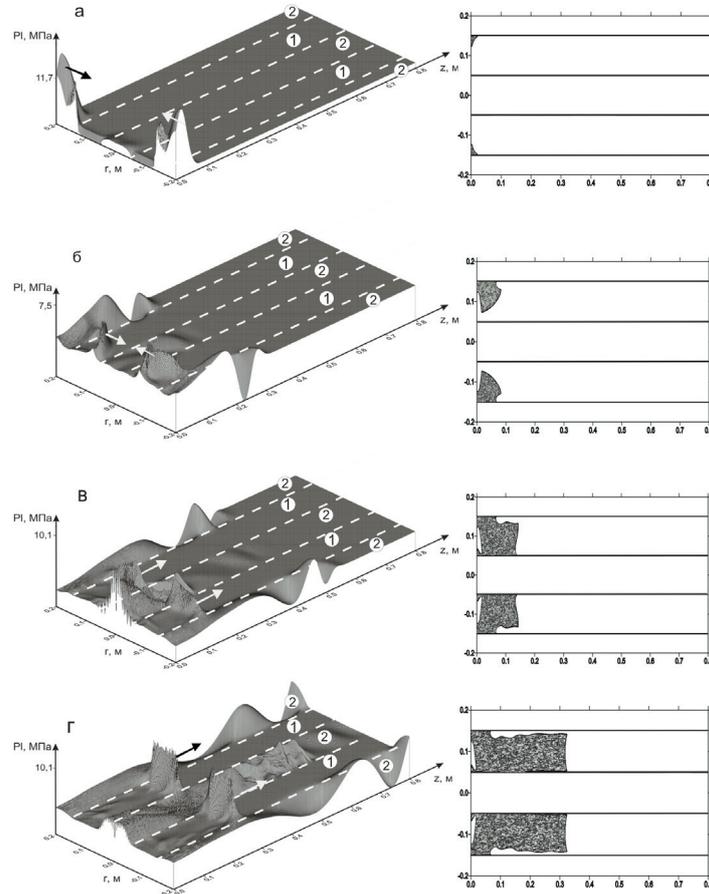


Рис. 4. Эпюры давления и соответствующие области воспламенения в моменты времени 0.06 мс, 0.20 мс, 0.35 мс и 0.71 мс

Из рис. 4а видно, что очаг детонации зарождается в приграничной области «чистой» жидкости, где удар по торцу трубы инициирует волну с амплитудой 11.7 МПа. При этом амплитуда волны в пузырьковом кольце практически незаметна. Этот эффект обусловлен разностью акустических импедансов: акустический импеданс  $\rho_l^0 C_l$  для «чистой» жидкости, значительно превышает аналогичный параметр для пузырьковой смеси, в результате чего амплитуды волн в пузырьковой зоне и «чистой» жидкости отличаются более, чем в 10 раз. На рис. 4б показано, что в пузырьковой области возникает детонационная волна с амплитудой 7.5 МПа, которая сформирована в результате распространения возникшей во внешнем слое «чистой» жидкости волны вдоль радиуса трубы к ее центру. Таким образом, инициирование детонации в пузырьковой области

вызывает не воздействие ударника по пузырьковой среде, а воздействие ударной волны «чистой» жидкости (рис. 4а). Возникшая детонационная волна в дальнейшем распространяется вдоль образующей трубы, поддерживая амплитуду 10.1 МПа (рис. 4в, 4г). Из представленных областей воспламенения видно, что детонация в пузырьковой области возникает локально у границы с «чистой» жидкостью (рис. 4а), после чего область воспламенения расширяется до противоположной границы с «чистой» жидкостью (рис. 4б), далее распространяется вдоль оси  $z$ .

Отметим, что у границы с внешним кольцом «чистой» жидкости небольшая область остается не охваченной детонацией вследствие поджатия детонационной волны этой области. Описанный процесс инициирования воспламенения и формирования детонационной волны в пузырьковом слое наблюдается при одновременном первоначальном импульсе по пузырьковому кольцу и внешнему кольцу «чистой» жидкости и при объемной доле пузырьков 3-4%. В остальных рассмотренных случаях: при том же характере удара, показанном выше, и объемной доле пузырьков 1-2 %; при торцевом ударе; при воздействии по пузырьковому кольцу — воспламенение распространяется от торца пузырькового кольца, охватывая всю пузырьковую область.

Таким образом, исследовано влияние геометрии первоначального импульса и объемного содержания пузырьков на процесс зарождения и распространения детонационных волн в кольцевом слое, заполненном газожидкостной средой, ограниченном цилиндрическими поверхностями с образующими параллельными оси  $z$ .

Установлено, что при различных условиях задания первоначального импульса реализуются различные картины распространения волновых возмущений, есть различия во временах возникновения детонации. При увеличении концентрации пузырьковой смеси процесс формирования солитона происходит дольше. Показано, что в случае воздействия ударником по торцу трубы, кроме центральной цилиндрической области «чистой» жидкости при объемной доле содержания пузырьков 1% детонационный солитон срывается в силу поджатия фоновыми волнами, а при концентрации пузырьков 3-4% из-за большого амплитудного значения давления в области «чистой» жидкости инициирование детонации может происходить не из-за воздействия ударника по пузырьковому кольцу, а из-за поджатия пузырькового кольца волной давления, возникающей в области «чистой» жидкости.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баязитова А.Р. Осесимметричные волны в пузырьковой жидкости: дисс. канд. ф.-м. наук. Тюмень, 2006. 134 с.
2. Нигматуллин Р.И. Динамика многофазных сред. Т 1. М.: Наука. 1987. 360 с.
3. Нигматуллин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. М: Наука. 1978. 336 с.
4. Гималудинов И.К., Ахмадуллин Ф.Ф. Двумерные детонационные волны в неоднородной по объемному содержанию газа пузырьковой жидкости // Мат-лы IV Уральской регион. науч.-практич. конференции «Современные физико-математические проблемы в педагогических вузах». Уфа, 2003. С. 23-36.
5. Баязитова Я.Р., Баязитова А.Р. Динамика детонационных волн в кольцевом пузырьковом слое // Тенденции и перспективы развития научного знания: Мат-лы III Междунар. науч.-практ. конф. М., 2012. С. 8-16.

6. Пинаев А.В., Сычев А.И. Влияние физико-химических свойств газа и жидкости на параметры и условия возникновения детонационных волн в системах жидкость — пузырьки газа // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23. № 6. С. 76-84.

7. Галимзянов М.Н., Гималтдинов И.К., Волны давления в неоднородной по объёмному содержанию газа пузырьковой жидкости / Мат-лы междунар. науч. конф. «Спектральная теория дифференциальных операторов и родственные проблемы». Уфа, 2003. С. 59-62.

8. Баязитова А.Р. Волны давления в трубе, заполненной пузырьковой смесью с неоднородным распределением по сечению / А.Р. Баязитова, И.К. Гималтдинов, В.Ш. Шагапов // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2006. №3. С. 65-76.

9. Сычев А.И. Волны детонации в системе жидкость — пузырьки газа // ФГВ. 1985. 21. №3. С.103-110.

10. Самарский А. А., Разностные методы решения задач газовой механики / А.А. Самарский, А.А. Попов. М.: Наука, 1980.

#### REFERENCES

1. Bajazitova, A.R. *Osesimmetrichnye volny v puzyr'kovoj zhidkosti* (diss. kand.) [Axisymmetric Waves in Bubbly Liquids (Cand. Diss.)]. Tyumen, 2006. 134 p. (in Russian).

2. Nigmatullin, R.I. *Dinamika mnogofaznyh sred* [Dynamics of Multiphase Media]. M.: Nauka, 1987. Vol. 1. 360 p. (in Russian).

3. Nigmatullin, R.I. *Osnovy mehaniki geterogennyh sred* [Principles of Mechanics of Heterogeneous Media]. M.: Nauka, 1978. 336 p. (in Russian).

4. Gimaltdinov, I.K., Ahmadullin, F.F. Two-dimensional Detonation Waves in Bubble Liquid with Heterogeneous Gas Holdup [Dvumernye detonacionnye volny v neodnorodnoj po ob'emnomu sodержaniju gaza puzyr'kovoj zhidkosti]. *Mat-ly IV Ural'skoj region. nauch.-praktich. konf. «Sovremennye fiziko-matematicheskie problemy v pedagogicheskikh vuzah»* (Materials of IV Ural regional practical and scientific conf. «Modern physical and mathematical problems in pedagogical universities»). Ufa, 2003. Pp. 3-36. (in Russian).

5. Bajazitova, Ja.R., Bajazitova, A.R. Dynamics of detonation waves in the annular bubble layer [Dinamika detonacionnyh voln v kol'cevom puzyr'kovom sloe]. *Tendencii i perpektivy razvitiya nauchnogo znaniya: Mat-ly III Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* (Tendencies and prospects of scientific knowledge development: Proc. of III Int. practical and scientific conf.). M., 2012. Pp. 8-16. (in Russian).

6. Pinaev, A.V., Sychev, A.I. The Effect of Physical and Chemical Properties of Gas and Liquids on the Parameters and Conditions of Detonation Waves in Liquid — Gas Bubbles Systems. *Fizika gorenija i vzryva — Physics of combustion and explosion*. 1987. Vol. 23. № 6. Pp. 76-84. (in Russian).

7. Galimzjanov, M.N., Gimaltdinov, I.K. Pressure Waves in Bubble Liquid with Heterogeneous Gas Holdup [Volny davlenija v neodnorodnoj po ob'emnomu sodержaniju gaza puzyr'kovoj zhidkosti]. *Mat-ly mezhdunar. nauch. konf. «Spektral'naja teorija differencial'nyh operatorov i rodstvvennye problemy»* (Proc. of Int. scientific conf. «Spectral theory of differential operators and related problems»). Ufa, 2003. Pp. 59-62. (in Russian).

8. Bajazitova, A.R. The Pressure Wave in the Tube Filled with Bubble Mixture with Heterogeneous Distribution over the Cross Section / A.R. Bajazitova, I.K. Gimaltdinov, V.Sh. Shagapov. *Izvestija RAN. Mehanika zhidkosti i gaza — Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Mechanics of liquid and gas*, 2006. № 3. Pp. 65-76. (in Russian).

9. Sychev, A.I. Detonation Waves in the Liquid — Gas Bubbles System. *Fizika gorenija i vzryva — Physics of combustion and explosion*, 1985. 21. №3. Pp. 103-110. (in Russian).

10. Samarskij, A.A. *Raznostnye metody reshenija zadach gazovoj mehaniki* [Difference Methods of Solving Problems of Gas Mechanics] / Samarskiy, A.A., Popov, A.A. M.: Nauka, 1980. (in Russian).