

На правах рукописи

АХМАДУЛЛИН ФАНИЛЬ ФАНЗИЛЕВИЧ

**ДИНАМИКА ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В НЕОДНОРОДНОЙ ПУЗЫРЬКОВОЙ  
ЖИДКОСТИ**

01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Тюмень 2005

Работа выполнена на кафедре прикладной математики и механики Стерлитамакской государственной педагогической академии.

Научный руководитель: член-корр. АН РБ, доктор физико-математических наук, профессор В.Ш. Шагапов

Научный консультант: кандидат физико-математических наук, доцент И.К. Гималтдинов

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор Лежнин С.И.;  
кандидат физико-математических наук Санников И.Н.

Ведущая организация: Башкирский государственный университет, г. Уфа

Защита диссертации состоится «18» мая 2005г. в 15<sup>00</sup> час. на заседании диссертационного совета ДМ 212.274.09 в Тюменском государственном университете по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская, д. 15<sup>А</sup>.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тюменского государственного университета по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Семакова, д. 10.

Автореферат разослан «\_\_» апреля 2005 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук



А.В. Татосов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Пузырьковая жидкость с горючей смесью газов (вода с пузырьками гремучего газа или смесью углеводородов с кислородом) является взрывчатым веществом (ВВ), в котором может возникать детонационная волна с амплитудой, достигающей до сотни атмосфер, при воздействии импульсом давления порядка десяти–двадцати атмосфер. 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 в свою очередь к аварийным ситуациям.

Интерес исследователей к проблеме пузырьковой детонации начиная с их экспериментального обнаружения Пинаевым А.В. и Сычевым А.И. не ослабевает. На данный момент активно ведутся исследования по динамике двумерных детонационных волн в пузырьковой жидкости (Ждан С.А., Кедринский В.К., Ляпидевский В.Ю. и др.). Исследование динамики двумерных и одномерных детонационных волн в пузырьковой жидкости, содержащей неоднородности (по объемному содержанию, радиусу пузырьков и т.д.), связано с анализом взрывобезопасности соответствующих гетерогенных систем, и поэтому является **актуальным**. Также актуальность диссертационной работы связана с необходимостью расширения и углубления теоретических представлений о нестационарных волновых процессах в многофазных средах, практической значимостью рассмотренных в работе проблем.

**Цели работы.** Теоретическое исследование динамики детонационных волн в пузырьковой жидкости в одномерной и двумерной постановках задачи. Анализ влияния состава и параметров смеси (неоднородность распределения объемного содержания газовой фазы и размера пузырьков) на эволюцию детонационных волн в таких пузырьковых жидкостях. Определение параметров пузырьковой смеси, при которых возможны возникновение и срыв детонационной волны. Исследование динамики двумерных детонационных волн, образующихся в результате взрыва завесы конечных размеров из-за воздействия импульсом давления на окружающую “чистую” жидкость. Изучение эволюции двумерных детонационных волн в области с кусочно-неоднородным по объемному содержанию распределением пузырьков. Исследование динамики детонационных волн, возникающих при воздействии с двух смежных границ области.

**Научная новизна.** В диссертации поставлен и решен ряд новых важных задач. Изучено влияние неоднородности распределения пузырьков в объеме пузырьковой жидкости на динамику детонационных волн. Выявлены различные режимы распространения детонационных волн, а также их характеристики, такие, как амплитуда, скорость распространения и т.д. Рассмотрен взрыв завесы конечных размеров с пузырьками, содержащими горючий газ, находящейся в объеме “чистой” жидкости при воздействии на границе “чистой” жидкости импульсом давления умеренной амплитуды. Исследована динамика двумерных детонационных волн в кусочно-неоднородной среде. Также рассмотрены детонационные волны, возникающие в однородной пузырьковой жидкости при воздействии со смежных границ.

**Практическая ценность.** Результаты, полученные в диссертационной работе, могут быть использованы для анализа взрывобезопасности соответствующих гетерогенных систем, а также интенсивности воздействия детонационных волн на элементы конструкции.

**Достоверность результатов.** Достоверность полученных в рамках диссертационной работы результатов обеспечивается корректным применением уравнений механики пузырьковой жидкости, сравнением результатов расчетов с экспериментальными данными, а так же с результатами расчетов других авторов.

**Апробация работы.** Основные результаты работы были представлены на следующих конференциях и научных школах:

- на школе-семинаре по механике многофазных систем под руководством академика РАН Нигматулина Р.И. (Стерлитамак, 2001; 2002);
- на школе-семинаре по проблемам механики сплошных сред, в системах добычи, сбора, подготовки, транспорта и переработки нефти под руководством академика АНА Мирзаджанзаде А.Х. (Уфа, 2001; 2002);
- на республиканской научной конференции студентов и аспирантов по физике и математике (Уфа, 2000);
- на Всероссийской научно-теоретической конференции «ЭВТ в обучении и моделировании» (Бирск, 2001; 2004);
- на VIII Четаевской международной конференции «Аналитическая механика, устойчивость и управление движением» (Казань, 2002);
- на VIII Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (Екатеринбург, 2002);
- на Международной научной конференции «Спектральная теория дифференциальных операторов и родственные проблемы» (Стерлитамак, 2003);
- на XIII сессии Российского акустического общества (Москва, 2003);
- на Всероссийской научной конференции «Современные проблемы физики и математики», посвященной 50-летию физико-математического факультета (Стерлитамак, 2004);
- на квалификационном семинаре отдела физической гидродинамики Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН (Новосибирск, 2005).

Кроме того, результаты, полученные в диссертационной работе, регулярно докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры прикладной математики и механики Стерлитамакской государственной педагогической академии под руководством профессора В.Ш. Шагапова.

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 10 работах, список которых приведен в конце автореферата.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 102 страницах и иллюстрирована 39 рисунками. Список литературы состоит из 70 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** отражена актуальность задач, рассмотренных в диссертационной работе, отмечена научная новизна, сформулирована цель, выделены задачи исследования и кратко изложена структура работы.

**В первой главе** выполнен обзор теоретических и экспериментальных исследований распространения детонационных волн в пузырьковой жидкости. Приведена система уравнений, описывающая распространение волн в пузырьковой жидкости.

**В § 1.1.** приводится обзор теоретических и экспериментальных работ по детонационным волнам.

**В § 1.2.** приводится полная система уравнений движения пузырьковой среды в рамках представлений механики сплошной среды, которая при соответствующих допущениях (отсутствует массообмен между пузырьками и жидкостью, температура жидкости постоянна, отсутствуют дробление и слипание пузырьков) имеет вид [1]:

$$\begin{aligned} \frac{d\rho_i}{dt} + \vec{\nabla} \cdot \rho_i \vec{v} = 0, \quad (i = l, g), \quad \frac{dn}{dt} + \vec{\nabla} \cdot n \vec{v} = 0, \\ \rho \frac{d\vec{v}}{dt} = -\vec{\nabla} p_l, \quad \rho = \rho_g + \rho_l, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\left( \frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} \right), \quad \alpha_l + \alpha_g = 1, \quad \rho_l = \rho_l^0 \alpha_l, \quad \alpha_g = \frac{4}{3} \pi n a^3,$$

$$w = w_R + w_A,$$

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

$$\frac{dp_g}{dt} = -\frac{3\gamma p_g w}{a} - \frac{3(\gamma-1)}{a} q,$$

где  $\rho_i^0$ ,  $\alpha_i$ ,  $\bar{v}$  ( $u$ ,  $v$ ),  $p_l$ ,  $n$ ,  $a$ ,  $w$ ,  $\gamma$ ,  $q$  – соответственно плотность, объемное содержание  $i$ -й фазы, скорость (составляющие скорости по координатам  $x$  и  $y$ ) и давление несущей жидкости, число и радиус пузырьков, скорость радиального движения, показатель адиабаты для газа, интенсивность теплообмена или тепловой поток от газа к жидкости, отнесенный к единице площади межфазной поверхности.

Интенсивность межфазного теплообмена примем в виде [1]

$$q = \lambda_g \text{Nu} (T_g - T_0) / 2a.$$

где  $T_0 = \text{const}$  – температура жидкости, Nu – число Нуссельта.

Числа Нуссельта и Пекле задаются в виде:

$$\text{Nu} = \begin{cases} \sqrt{Pe}, & Pe \geq 100 \\ 10, & Pe < 100 \end{cases}, \quad Pe = 12(\gamma-1) \frac{T_0}{|T_g - T_0|} \frac{a|w|}{\kappa_g},$$

где  $\kappa_g = \lambda_g / c_g \rho_{g0}$ ,  $\lambda_g$ ,  $c_g$  – коэффициент температуропроводности, коэффициент теплопроводности и теплоемкость газа соответственно.

Жидкость примем акустически сжимаемой, а газ калорически совершенным:

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

Воспламенение газа учитывается следующим образом: при достижении температуры  $T_*$ , температура в пузырьках мгновенно изменяется на некоторую величину  $\Delta T$ .

**Во второй главе** представлен переход от эйлеровых переменных к лагранжевым, поскольку в лагранжевых переменных проведение численных расчетов является более удобным. Здесь же рассмотрено построение разностной схемы для численного расчета. Проведено тестирование модели сравнением полученных результатов с экспериментальными данными и результатами расчетов других авторов. Исследованы: влияние неоднородности объемного содержания газа и радиусов газовых пузырьков на эволюцию детонационных волн; переход волны пузырьковой детонации в чистую жидкость.

В § 2.1. приводится переход от эйлеровой системы к лагранжевой системе координат. Необходимость перехода связана с тем, что в эйлеровых координатах происходит так называемый эффект размывания координатной сетки. Поэтому после каждого цикла приходилось бы пересчитывать положения узлов и вносить поправки, а в лагранжевых координатах первоначальные границы неоднородностей остаются неподвижными.

В § 2.2. описан принцип построения разностной схемы для аппроксимации системы уравнений (1) для одномерного случая.

В § 2.3. проведено тестирование модели путем сравнения расчетных значений скорости детонационной волны с экспериментальными данными (Пинаев А.В., Сычев А.И.) и расчетными значениями, полученными С.А. Жданом.

В § 2.4. рассматривается эволюция волны типа “ступенька” в неоднородной по объемному содержанию газа пузырьковой жидкости, образующейся, когда давление в момент времени  $t=0$  на границе  $x_0 = 0$ , мгновенно повышается от начального равновесного значения  $p_0$  до  $p_0 + \Delta p$  и поддерживается таким в течение всего времени процесса (рис. 1). Область расчета разделена на две зоны с разными объемными содержаниями  $\alpha_{g0}^{(1)}$ ,  $\alpha_{g0}^{(2)}$ .

На рис. 1 представлены эпюры давления в жидкости и температуры газа в моменты времени, соответствующие цифрам у кривых. При распространении волны давления по пузырьковой жидкости происходит инерционное сжатие пузырьков. Если амплитуда исходной волны мала настолько, что температура газа в пузырьках в волне меньше температуры воспламенения горючей смеси  $T_*$ , то горючий газ в пузырьках не воспламеняется. В этом случае имеем общую картину распространения волны давления, характерную для газожидкостных пузырьковых

сред. Такую картину на рис. 1 иллюстрирует кривая, соответствующая моменту времени  $t = 1.5$  мс, распространяющаяся в зоне 1. Далее эта волна переходит границу между зонами 1 и 2. При переходе ступенчатой волны из зоны с большим объемным содержанием в зону с меньшим объемным содержанием на границе между этими зонами реализуется условие, аналогичное условию отражения от твердой стенки. Поэтому из-за эффектов нелинейности, амплитуды отраженной и проходящей волн могут в несколько раз превышать амплитуду первоначальной волны. При этом для представленного примера в зоне 2 достигается температура воспламенения  $T_*$ . В результате этого происходит воспламенение газа в пузырьках и последующее распространение детонационной волны во второй зоне.

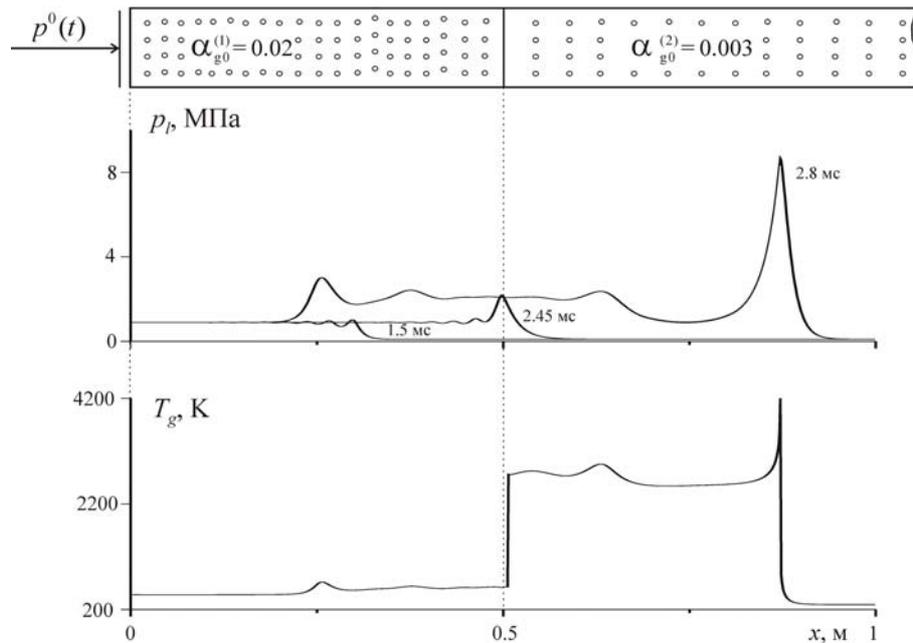


Рис. 1. Возникновение детонационного солитона. Параметры системы: жидкость – водоглицериновый раствор (с объемной концентрацией глицерина 0.5), газ - ацетиленокислородная стехиометрическая смесь  $C_2H_2 + 2.5O_2$ ,  $a_0 = 2$  мм,  $\Delta p_0 = 0.8$  МПа,  $x_{01} = 0.5$  м,  $\alpha_{g0}^{(1)} = 0.02$ ,  $\alpha_{g0}^{(2)} = 0.003$ ,  $T_* = 1000$  К,  $\Delta T = 3200$  К

На рис. 2 представлены результаты расчета, когда сформировавшаяся в зоне 1 при воздействии П-образным импульсом давления амплитудой  $\Delta p$  и временной протяженностью  $t_*$ , с объемным содержанием газа  $\alpha_{g0}^{(1)} = 2.5 \cdot 10^{-3}$  детонационная волна при своей эволюции проходит в зону 2 с объемным содержанием газа  $\alpha_{g0}^{(2)} = 0.06$ . Представлены эпюры давления в жидкости, цифры у кривых соответствуют моментам времени. Видно, что в зоне 1 параметры смеси и инициирующей волны такие, что на переднем фронте ударной волны температура газа в пузырьках достигает значения  $T_*$  и образуется детонационная волна. При прохождении границы между зонами 1 и 2, детонационная волна “срывается”, т.е. в зоне 2 детонационная волна отсутствует и распространение волны происходит как в неактивной газожидкостной среде. Это связано с тем, что зона 2 акустически “мягче”, чем зона 1 и при переходе детонационной волны реализуется условие, аналогичное условию отражения от свободной поверхности, и детонационная волна проникает в зону 2 с меньшей амплитудой, частично отражаясь как волна разгрузки, поэтому амплитуда детонационной волны в зоне 2 не способна к сжатию пузырьков до температуры  $T_*$ , и детонационная волна “срывается”.

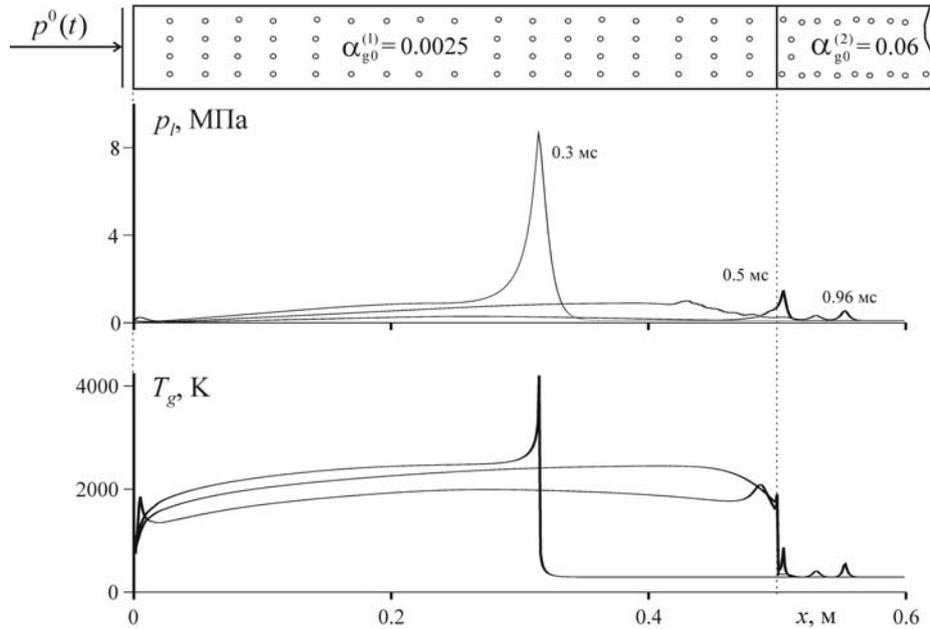


Рис. 2. Срыв детонационной волны. Параметры системы:  $\Delta p_0 = 2$  МПа,  $t_* = 0.02$  мс,  $x_{01} = 0.5$  м,  $\alpha_{g0}^{(1)} = 0.0025$ ,  $\alpha_{g0}^{(2)} = 0.06$ ,  $a_0 = 1$  мм. Остальные параметры такие же как на рис. 1

В § 2.5. описывается динамика детонационной волны в области, которая разделена на две зоны с одинаковыми объемными содержаниями пузырьков, но с разными радиусами  $a_0^{(1)}$  и  $a_0^{(2)}$ . Рассмотрен переход детонационной волны, сформировавшейся в зоне с крупными пузырьками, в зону с более мелкими пузырьками, и наоборот. При переходе детонационной волны в зону с более крупными пузырьками, происходит увеличение ее ширины, и, наоборот, при переходе в зону с более мелкими пузырьками, происходит уменьшение ее ширины. Это связано с тем, что частота собственных колебаний более крупных газовых пузырьков меньше.

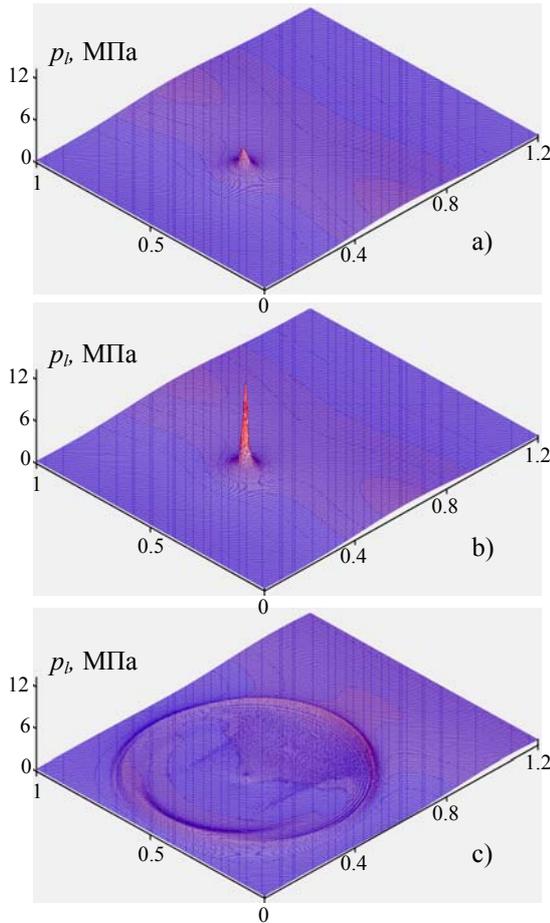
В § 2.6. рассматривается случай, когда сформировавшаяся в пузырьковой жидкости детонационная волна переходит в чистую жидкость. При этом наблюдается увеличение амплитуды детонационной волны, как следствие перехода волны из акустически более мягкой среды в более жесткую.

В третьей главе рассматривается динамика двумерных детонационных волн. Приводится переход от эйлеровой системы к лагранжевой системе координат для двумерного случая и построение разностной схемы для численного расчета. Рассмотрен взрыв завесы с горючими пузырьками конечных размеров, находящейся в объеме “чистой” жидкости при воздействии на границу “чистой” жидкости давлением умеренной амплитуды. Исследована динамика двумерных детонационных волн в кусочно-неоднородной среде. Также изучены детонационные волны, возникающие в однородной пузырьковой жидкости при воздействии со смежных границ.

В § 3.1. представлен переход от эйлеровой системы к лагранжевой системе координат с учетом относительного движения фаз. После некоторых преобразований из системы (1) получается следующая система для численного расчета:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_l}{\partial t} &= \frac{C_l^2 \rho_l^0}{(1-\alpha_g)} \left[ \frac{3\alpha_g}{a} w - \left( \frac{\alpha_g}{J} + \frac{\rho_{l0}}{J^2 \rho_l^0} \right) \frac{\partial J}{\partial t} \right], \\ \frac{\partial u}{\partial t} &= -\frac{1}{J\rho} \left( \frac{\partial p_l}{\partial x_0} \frac{\partial y}{\partial y_0} - \frac{\partial p_l}{\partial y_0} \frac{\partial x}{\partial x_0} \right), \quad \frac{\partial x}{\partial t} = u, \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= -\frac{1}{J\rho} \left( \frac{\partial p_l}{\partial y_0} \frac{\partial x}{\partial x_0} - \frac{\partial p_l}{\partial x_0} \frac{\partial y}{\partial y_0} \right), \quad \frac{\partial y}{\partial t} = v, \\ \frac{\partial \alpha_g}{\partial t} &= \frac{3\alpha_g}{a} w - \frac{\alpha_g}{J} \frac{\partial J}{\partial t}, \quad \frac{\partial p_g}{\partial t} = -\frac{3\gamma p_g}{a} w - \frac{3(\gamma-1)}{a} q, \end{aligned}$$

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



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

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

В § 3.2. описан принцип построения разностной схемы, принятой для аппроксимации системы дифференциальных уравнений, приведенных в § 3.1.

В § 3.3. показана динамика процесса взрыва цилиндрического “столба” из пузырьков, находящегося внутри полубесконечного объема жидкости, при импульсном воздействии через границу.

Рис. 3. Давление в жидкости при взрыве пузырьковой области, находящейся в объеме чистой жидкости. Параметры системы:  $a_0 = 1.5$  мм,  $\alpha_{g0} = 0.02$ ,  $\Delta p_0 = 0.95$  МПа,  $x_{01} = 0.4$  м,  $y_{01} = 0.5$  м,  $R = 3.5 \cdot 10^{-2}$  м,  $t_* = 1$  мс,  $t_0 = 0.16$  мс. Остальные параметры такие же как на рис. 1. Картинки а, б и с соответствуют моментам времени 0.82 мс, 0.83 мс и 1 мс

Пузырьковая область задается в виде цилиндра с радиусом  $R$ , с центром в точке с координатой  $(x_{01}, y_{01})$  и объемным содержанием газа  $\alpha_{g0}$ . На границе  $x_0 = 0$  давление задается следующим образом:

$$p(t) = \begin{cases} p_0 + \Delta p_0 \cdot \exp\left(-((t-t_*)/t_0)^2\right), & 0 < t \leq t_*, \\ p_0, & t > t_*. \end{cases} \quad (2)$$

На рис. 3 приведены профили давления жидкости, соответствующие различным моментам времени. При распространении импульсных сигналов в жидкости, содержащей пузырьковую завесу, в случае, когда временная протяженность импульса большая ( $t_* > 2R/C$ , где

$C = (\gamma \cdot p_0 / \alpha_{g0} \cdot \rho_{l0})^{1/2}$  – равновесная скорость звука в пузырьковой жидкости), внутри завесы в определенные моменты времени возможны “башнеобразные” профили давления и температуры пузырьков с достаточно высокими пиковыми значениями. Здесь рассмотрена ситуация, когда такое пиковое значение температуры достигает температуры воспламенения, и в последующем развивается процесс детонации. На рис. 3 а) приведено распределение давления жидкости в момент времени  $t = 0.82$  мс. Видно, что в области, где находится завеса, произошло увеличение амплитуды давления в жидкости. К этому моменту времени максимальная температура газа в пузырьках еще не достигла температуры воспламенения. При дальнейшем распространении импульса пиковая температура газа достигает температуры воспламенения, и в завесе возникает детонационная волна, рис. 3 б). Далее происходит переход детонационной волны в чистую жидкость. При этом в чистой жидкости достигается максимальное давление  $p_m = 13.2$  МПа, как следствие перехода из акустически более мягкой среду в жесткую. На рис. 3 с) представлено распределение давления жидкости в момент  $t = 1.0$  мс, когда взрывная волна из завесы вышла в зону чистой жидкости. Максимальное значение давления в зоне взрыва (в завесе) уменьшилось до значения  $p_m = 0.6$  МПа.

В § 3.4. приводится динамика ударной волны в пузырьковой жидкости, когда объемное содержание газа линейно меняется в поперечном направлении от значения  $\alpha_{g0}^{(1)}$  до  $\alpha_{g0}^{(2)}$ . Импульс на границе  $x_0 = 0$  задается выражением (2).

При распространении импульсных сигналов в такой пузырьковой жидкости у границы с большим объемным содержанием происходит фокусировка импульса, и вследствие этого повышается амплитуда давления у этой границы по сравнению с амплитудой первоначальной ударной волны. Здесь рассмотрена ситуация, когда при таком усилении амплитуды волны давления у границы с большим объемным содержанием газа достигается температура воспламенения, что в последующем приводит к развитию процесса детонации в пузырьковой жидкости.

На рис. 4 приведены системы изобар и эпюры давления по координате  $x$  для различных значений координаты  $y$  в одни и те же моменты времени. К моменту времени 0.62 мс (рис. 4 а) у границы с большим объемным содержанием температура газа внутри пузырьков достигает значения  $T_*$ , и начинается процесс детонации. Из рис. 4 б), соответствующего моменту 1.62 мс следует, что воспламенение газа в пузырьках распространяется на всю ширину расчетной области. Рис. 4 с) показывает, что детонационная волна распространяется по всей области расчета с максимальной амплитудой 24 МПа, которое достигается около стенки с большим объемным содержанием газа.

В § 3.5. описывается динамика детонационной волны, возникающей в слое пузырьковой жидкости, находящейся в чистой жидкости, при воздействии импульсом давления. При воздействии по всей границе  $x_0 = 0$  ударная волна, распространяющаяся по чистой жидкости, обгоняет волну, распространяющуюся по пузырьковой жидкости, и предварительно “поджимает”, изменяя ее параметры (объемное содержание газа, радиус пузырьков, давление газа в пузырьках). В результате этого происходит увеличение амплитуды ударной волны, распространяющейся в слое пузырьковой жидкости. В последующем в пузырьках достигается температура воспламенения, и начинается процесс детонации. Если воздействовать только на границу, соответствующую слою пузырьковой жидкости, то для возбуждения детонации необходим импульс, имеющий более высокую амплитуду.

В § 3.6. показана динамика детонационной волны, возникающей в пузырьковой жидкости при воздействии со смежных границ импульсами давления разных амплитуд. При воздействии с двух смежных границ, на пересечении двух волн происходит нелинейное сложение амплитуд давления. В результате в пузырьковой жидкости возникает детонационная волна. Причем импульсы в отдельности не способны возбудить детонацию.

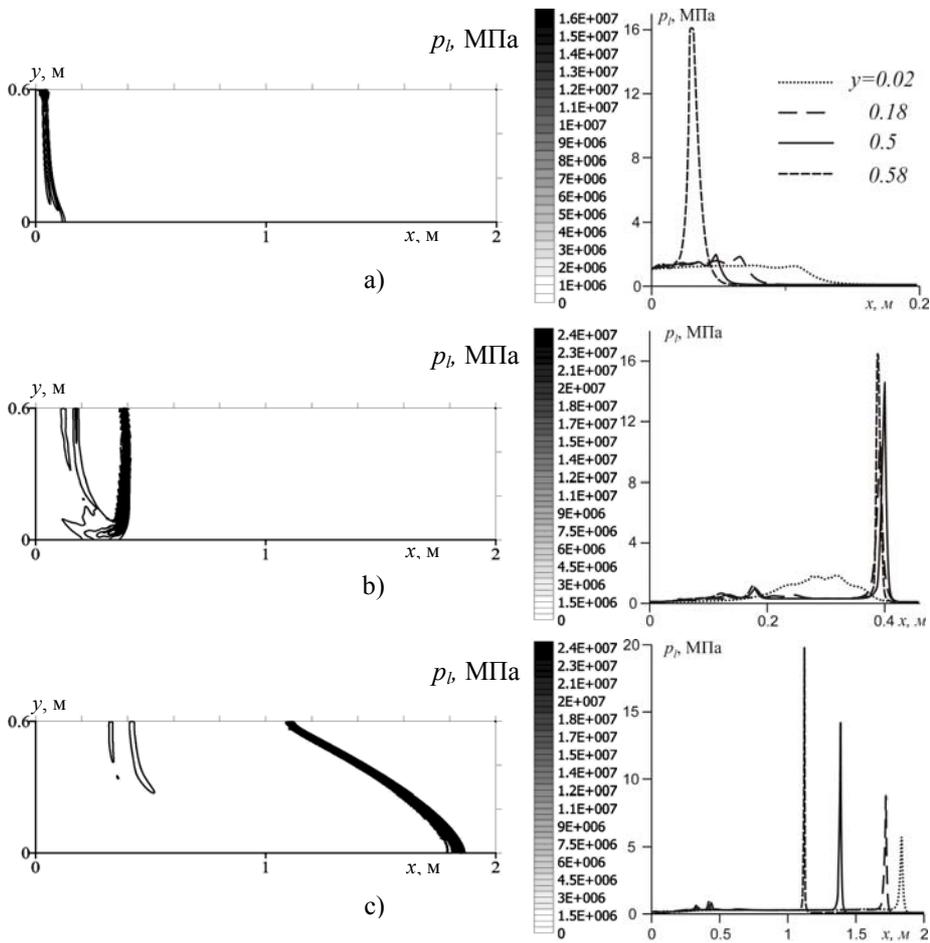


Рис. 4. Профиль детонационной волны в неоднородной по объемному содержанию газа пузырьковой жидкости. Параметры системы:  $a_0 = 1.5$  мм,  $\Delta p_0 = 1.65$  МПа,  $\alpha_{g0}^{(1)} = 5 \cdot 10^{-3}$ ,  $\alpha_{g0}^{(2)} = 8 \cdot 10^{-2}$ ,  $L_y = 0.6$  м,  $t_* = 0.5$  мс,  $t_0 = 0.16$  мс. Остальные параметры такие же как на рис. 1. Картинки а, б и с соответствуют моментам времени 0.62 мс, 1.62 мс и 3.56 мс

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Исследована динамика одномерных и двумерных детонационных волн в пузырьковой жидкости. Рассмотрено возникновение и распространение детонационной волны в жидкости, содержащей пузырьковую зону конечных размеров. Изучена динамика детонационных волн при прохождении зон, различающихся объемным содержанием пузырьков и зон с различными радиусами пузырьков, а также динамика детонационных волн, возникающих в пузырьковой жидкости с неоднородным распределением объемного содержания газа под воздействием импульсов давления различной формы. По результатам исследований могут быть сделаны следующие выводы:

1. При переходе волны типа ступенька из зоны с большим объемным содержанием в зону с меньшим объемным содержанием на границе между этими зонами происходит нелинейное отражение, из-за которого амплитуды проходящей и отраженной волн значительно превышают амплитуду первоначальной волны. При этом во второй зоне вблизи границы может достигаться температура воспламенения  $T_*$  и как следствие – зарождение и распространение от границы неоднородности волны детонации.

2. Детонационная волна при прохождении через границу из зоны с меньшим объемным содержанием в зону с большим объемным содержанием может срываться, то есть детонационная волна и следующая за ней ударная волна при прохождении через эту границу не способны инициировать детонацию в зоне с более высоким объемным содержанием газа (являющейся, вообще говоря, более калорийным взрывчатым веществом). Это связано с тем, что вторая зона акустически значительно более мягкая среда, чем первая зона, и в процессе взаимодействия детонационной волны (а также последующей за ним ударной волны) с границей между зонами неоднородностей, эта граница для первой зоны аналогична свободной поверхности.

3. При распространении волны сжатия по чистой жидкости, содержащей пузырьковую зону конечных размеров с пузырьками, содержащими горючий газ, в случае, когда временная протяженность импульса большая ( $t_* > 2R/C$ ), в завесе возникают башнеобразные профили давления и температуры с достаточно высокими пиковыми значениями. Если амплитуда исходного импульса достаточна для инициирования воспламенения, то происходит взрыв пузырьковой завесы. Такое воздействие на пузырьковую завесу через окружающую “чистую” жидкость, сопровождаемое двумерными и нелинейными эффектами, существенно снижает амплитуду инициирующего импульса, способного возбудить детонацию.

4. При воздействии импульсом давления по пузырьковой жидкости, объемное содержание газа в которой плавно меняется в направлении, поперечном к направлению распространения волны, происходит ее фокусировка к границе с большим объемным содержанием. Причем амплитуда трансформированной волны может превышать амплитуду инициирующей ударной волны в несколько раз. В дальнейшем это обстоятельство способствует воспламенению пузырьков и развитию детонации во всем объеме. Таким образом, поперечная неоднородность объемного содержания газа приводит к снижению амплитуды инициирующего импульса, способного возбудить детонацию.

5. При воздействии импульсом давления на пузырьковую жидкость, экранированную от стенок канала слоями “чистой” жидкости, из-за дополнительного поджатия пузырьковой зоны возмущениями, распространяющимися по слоям “чистой” жидкости, снижается амплитуда инициирующих импульсов, способных возбудить детонацию в пузырьковом слое.

### Цитированная литература

1. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. – М.: Наука. – Т 1; 2. – 1987. – 360 с.

#### Публикации по теме диссертации

1. Нигматулин Р.И., Шагапов В.Ш., Гималтдинов И.К., Ахмадуллин Ф.Ф. Взрыв пузырьковой завесы с горючей смесью газов при воздействии импульсом давления // Доклады РАН. – Т.388. – №5. – 2003. – С. 611-615.
2. Гималтдинов И.К., Ахмадуллин Ф.Ф. Детонационные волны в неоднородной по объемному содержанию газа пузырьковой жидкости // Сб. трудов XIII сессии Росс. акустического общества “Физическая акустика. Распространение и дифракция волн”. – Москва: ГЕОС, 2003. – С. 21-25.
3. Гималтдинов И.К., Ахмадуллин Ф.Ф. Динамика двумерных детонационных волн в пузырьковой жидкости при локализованном воздействии // Труды междунар. науч. конф. “Спектральная теория дифференциальных операторов и родственные проблемы”. – Уфа, 2003. – С. 72-77.
4. Ахмадуллин Ф.Ф. Импульсное воздействие на химически активную пузырьковую жидкость с двух смежных границ // Третья Всерос. науч.-теор. конф. “ЭВТ в обучении и моделировании”. – Бирск, 2004. – С. 7-13.
5. Гималтдинов И.К., Ахмадуллин Ф.Ф. Детонационные волны в слоисто-неоднородной по объемному содержанию газа пузырьковой жидкости // Труды Всерос. науч. конф. “Современные проблемы физики и математики”. – Уфа. – Т. 2, 2004. – С. 54-56.
6. Гималтдинов И.К., Ахмадуллин Ф.Ф. Двумерные детонационные волны в пузырьковой жидкости // Восьмая Четаевская междунар. конф. “Аналитическая механика, устойчивость и управление движением”. – Казань, 2002. – С. 245.
7. Гималтдинов И.К., Ахмадуллин Ф.Ф. Детонационные волны в жидкости, содержащей пузырьковую зону конечных размеров // Восьмая Всерос. науч. конф. студентов-физиков и молодых ученых. – Екатеринбург, 2002. – С. 291-293.
8. Галимзянов М.Н., Ахмадуллин Ф.Ф. Двумерные эффекты при эволюции волн давления в пузырьковой жидкости с неравномерно распределенным объемным содержанием газа // Республ. науч. конф. студентов и аспирантов по физике и математике. – Уфа, 2000. – С. 172-173.
9. Гималтдинов И.К., Ахмадуллин Ф.Ф., Шагапов В.Ш. Двумерные детонационные волны в пузырьковой жидкости при локализованном воздействии // Материалы третьей Всерос. науч.-практ. школы семинара “Обратные задачи химии”. – Бирск, 2003. – С. 77-82.
10. Гималтдинов И.К., Ахмадуллин Ф.Ф. Двумерные детонационные волны в неоднородной по объемному содержанию газа пузырьковой жидкости // Материалы IV Уральской регион. науч.-практ. конф. БГПУ “Современные физико-математические проблемы в педагогических вузах”. – Уфа, 2003. – С. 34-36.

Подписано в печать 12.04.2005 г.  
Гарнитура «Таймс». Бумага ксероксная. Формат 60×80<sub>1/16</sub>.  
Печать оперативная. Усл.-печ. л. 1,6.  
Заказ №...../05. Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии Стерлитамакской государственной педагогической академии:  
453103, Стерлитамак, пр. Ленина, 49.