

0-803849

*На правах рукописи*



АГИШЕВА УЛЬЯНА ОЛЕГОВНА

**ОСОБЕННОСТИ УДАРНО - ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ  
В ГАЗОЖИДКОСТНЫХ СРЕДАХ**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Уфа – 2013

Работа выполнена на кафедре механики сплошных сред факультета математики и информационных технологий ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный университет» и в ФГБун Институт механики им. Р. Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
**Болотнова Раиса Хакимовна**

Официальные оппоненты: **Житников Владимир Павлович**  
доктор физико-математических наук,  
профессор, заведующий кафедрой  
компьютерной математики ФГБОУ ВПО  
«Уфимский государственный авиационный  
технический университет» (УГАТУ)

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КФУ



851 855

**Гималтдинов Ильяс Кадирович**  
доктор физико-математических наук,  
профессор, заведующий кафедрой прикладной  
математики и механики Стерлитамакского  
филиала ФГБОУ ВПО «Башкирский  
государственный университет»

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный  
университет»

Защита диссертации состоится «26» декабря 2013 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.013.09 в Башкирском государственном университете по адресу: г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32, физико-математический корпус, ауд. 216.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Башкирского государственного университета.

Автореферат разослан « 25 » ноября 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д.т.н., профессор

Ковалева Л.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы**

Важность изучения динамики ударных волн в газожидкостных средах объясняется широким спектром практических задач: обеспечение пыле- и шумоподавления, пожаро- и взрывобезопасности технологических процессов, предупреждение загрязнений окружающей среды, защита зданий, сооружений, транспортных средств и людей от разрушительной силы ударной волны. Пузырьковые среды способны поглощать, трансформировать и повторно излучать энергию волны сжатия, причем амплитуда возникшего локального импульса может превышать амплитуду первоначального возмущения, что приводит к кумулятивному сжатию и, как следствие, значительному росту давления и температуры внутри пузырьков.

Эффективность пузырьковых жидкостей и водных пен в качестве защитных барьеров, локализирующих действие взрыва, объясняется их высокой сжимаемостью, следствием которой является существенное уменьшение скорости распространения акустических и ударных волн в газожидкостных смесях.

Существующие теоретические исследования этого направления в основном ограничиваются учетом сжимаемости газопаровой смеси только за счет газовой фазы или в предположении слабой (линейной) сжимаемости жидкости. В реальных физических процессах проявление сжимаемости жидкости сопровождается действием менее заметных, но значимых эффектов, например, вязкостью, теплопроводностью и др. В быстропотекающих высокоинтенсивных процессах свойство сжимаемости жидкости зачастую оказывается определяющим.

Таким образом, моделирование динамических процессов в газожидкостных системах при расчете сильных ударных волн с учетом сжимаемости жидкой фазы является актуальной задачей и позволяет прогнозировать, предупреждать и локализовать взрывоопасные ситуации, возникающие в процессе ударного воздействия на исследуемые объекты.

### **Цели работы**

- Параметрический анализ характеристик газожидкостной смеси при распространении и отражении от твердой стенки ударных волн на основе соотношений Рэнкина – Гюгонио.
- Исследование динамических процессов, возникающих при распространении и взаимодействии сильных ударных волн в пузырьковых средах при варьировании амплитуды воздействия и газосодержания смеси.

- Исследование и анализ особенностей взаимодействия ударных волн с пенной преградой с оценкой эффективности ее демпфирующих способностей в зависимости от плотности (водосодержания) пены.

- Анализ динамики ударных волн в двухфазных газожидкостных смесях в рамках двумерной осесимметричной модели.

#### **Научная новизна работы**

Решена задача по определению параметров падающих и отраженных ударных волн в газожидкостной среде для различных давлений ударных волн и начальных газосодержаний. Установлены интенсивности ударных волн, при которых обнаруживается влияние нелинейной сжимаемости жидкой фазы, описываемой широкодиапазонным уравнением состояния.

Разработана модель двухфазной смеси в одномерном и двумерном осесимметричном приближении для исследования волновых процессов в газожидкостных средах.

Рассмотрены особенности пространственной эволюции волновой картины течения при воздействии сильного локального ударного импульса давления на границе замкнутого объема, заполненного пузырьковой жидкостью. Проведен анализ процесса формирования зон локальной фокусировки импульсов давления, формирующихся при обжатии двумерного осесимметричного цилиндра.

Изучена эффективность гашения ударной волны при прохождении барьера из водной пены в зависимости от начального водосодержания и неоднородности плотности пены, возникающей в процессе синерезиса (старения пены). Исследовано влияние двумерных эффектов при взаимодействии воздушного ударно-волнового импульса с пенной защитой.

**Достоверность результатов**, полученных в диссертационном исследовании, обеспечивается корректным применением уравнений механики многофазных сред при постановке математической задачи; использованием апробированных численных методов; подтверждается удовлетворительным согласованием численных и аналитических расчетов и сравнением полученных решений с экспериментальными данными.

#### **Практическая ценность**

Анализ параметров ударных волн в газожидкостных смесях в широком диапазоне давлений и исследование закономерностей взаимодействия волновых импульсов в пузырьковых жидкостях и пенах позволят определять оптимальные режимы ударного воздействия на исследуемые среды для решения практически важных задач. Полученные результаты могут быть использованы для предотвращения возникновения аварийных ситуаций, связанных со взрывоопасными работами, а также для создания эффективных защитных барьеров,

локализирующих энергию взрыва при проведении технических и хозяйственных работ.

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

▪ Определен диапазон давлений ударных волн в газожидкостных смесях, когда важно применение широкодиапазонного уравнения состояния Нигматулина, Болотновой для учета нелинейной сжимаемости жидкой компоненты.

▪ Показана зависимость эффективности барьера из водной пены от газосодержания и особенностей формирования неоднородности плотности пены в процессе синерезиса.

▪ Выявлены зоны формирования и трансформации ударно-волновых импульсов давления при воздействии интенсивного локального ударного импульса на ограниченный цилиндрический объем, заполненный газожидкостной смесью.

#### **Апробация работы**

Основные результаты, полученные в диссертационном исследовании, докладывались на следующих конференциях и научных школах:

– Семнадцатой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (г. Екатеринбург, март 2011г.).

– Всероссийской научной конференции с международным участием «Дифференциальные уравнения и их приложения» (г. Стерлитамак, июнь 2011г.).

– X Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (г. Н. Новгород, август 2011г.).

– Международной молодежной школе-конференции «Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании» (г. Уфа, октябрь 2011г.).

– Российской конференции «Многофазные системы: теория и приложения» (г. Уфа, июль 2012г.).

– «International Conference on Fluid Dynamics 2012» (ICCFD, г. Париж, Франция, август 2012г.).

– Всероссийской научной школе молодых ученых «Волны и вихри в сложных средах» (г. Москва, декабрь 2012г.).

– Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Актуальные вопросы науки и образования» (г. Уфа, апрель 2013г.).

– Международной конференции «Fluxes and Structures in Fluids» (г. Санкт-Петербург, июнь 2013г.).

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №11-01-97004-р\_поволжье\_a; №11-01-00171- а, №12-01-09307-моб\_з; программы фундаментальных исследований ОЭММПУ РАН (ОЭ-13); Молодежного научно-инновационного конкурса «УМНИК» (г. Уфа, 2013).

### Публикации

Основные результаты, полученные в диссертации, опубликованы в 14 работах, в том числе 5 из них в журналах из перечня ВАК.

### Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 132 страницы, включая 33 рисунка, 3 таблицы и список литературы, состоящий из 162 наименований.

Автор искренне благодарит своего научного руководителя доктора физ.-мат. наук Болотнову Раису Хакимовну за постановку задач, постоянное внимание и поддержку при подготовке диссертации. Автор выражает признательность доктору физ.-мат. наук, профессору Урманчееву Саиду Федоровичу за полезные советы при обсуждении работы.

### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы основные цели исследований, отмечена научная новизна, достоверность и практическая значимость результатов работы, изложена структура диссертации.

В первой главе приводится обзор теоретических и экспериментальных исследований, посвященных динамике нелинейных волн в газоожидкостных системах, проводимых в работах Р. И. Нигматулина, I. J. Campbell, A. S. Pitcher, X. A. Рахматулина, С. С. Кутателадзе, В. Е. Накорякова, В. Г. Гасенко, В. Ш. Шагапова, А. А. Губайдуллина, А. И. Ивандаева, Б. И. Паламарчука, В. С. Сурова, А. Vrital и др.

Во второй главе на основе законов сохранения массы каждой фазы, импульса и энергии смеси на фронте ударной волны (соотношений Рэнкина – Гюгонио) с использованием широкодиапазонного уравнения состояния воды и пара в форме Ми – Грюнайзена определены параметры падающих и отраженных ударных волн в газоожидкостной среде для случаев изотермического, адиабатического и ударного сжатий газовой компоненты для различных интенсивностей волн и начальных газосодержаний. Проведено обоснование используемого в исследованиях других авторов предположения, что при отсутствии фазовых переходов в случае односкоростной двухтемпературной модели смеси с равным давлением фаз и условием аддитивности по массе внутренней энергии смеси каждая компонента сжимается по индивидуальной ударной адиабате.

На рис. 1 приведены расчеты степени усиления отраженной ударной волны  $p_2/p_1$  в зависимости от интенсивности проходящей волны по моделям адиабатической (сплошная) и ударной (штриховая) сжимаемости газовой фазы для

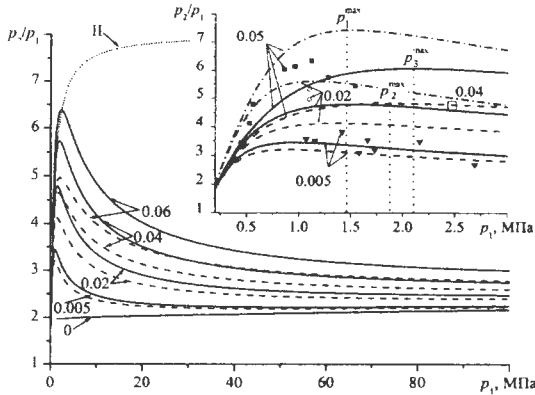


Рис. 1. Степень усиления давления  $p_2/p_1$  в отраженной УВ в зависимости от давления  $p_1$  для различных  $\alpha_{g0}$ . Экспериментальные точки:  $\square$  - А. И. Сычев, 2010;  $\circ, \blacksquare, \blacktriangledown$  - Б. Е. Гельфанд и др., 1978.

различных газосодержаний. Линия II – асимптотика предельной степени усиления по модели ударного сжатия. Расчеты показывают рост амплитуды давления в отраженной волне с увеличением начального объемного газосодержания  $\alpha_{g0}$  и ее уменьшение с ростом давления  $p_1$ . Показано, что использование модели ударного сжатия газовой компоненты наилучшим образом описывает экспериментальные данные по отражению ударной волны в пузырьковой жидкости. На дополнительном фрагменте рис. 1 представлены расчеты по модели изотермического сжатия газа (штрих-пунктир) и приведены экспериментальные данные. При  $\alpha_{g0} = 0.05$  на дополнительном фрагменте показано максимальное значение коэффициента отражения в случае использования изотермической ( $p_1^{\text{max}}$ ), ударной ( $p_2^{\text{max}}$ ) и адиабатической ( $p_3^{\text{max}}$ ) моделей сжатия газовой компоненты. Для малых газосодержаний ( $\alpha_{g0} = 0.005$ ) модели адиабатического и ударного сжатий газа в смеси дают сходные результаты, сопоставимые с данными экспериментальных исследований.

При анализе расчетных зависимостей скорости фронта падающих и отраженных ударных волн от давления  $p_1$  при заданной концентрации газа  $\alpha_{g0}$  обнаружен узел, который характеризует изменение режима ударно-волнового течения: до 14.32 МПа с ростом  $\alpha_{g0}$  скорость фронта снижается аналогично скорости падающей ударной волны, за счет сжатия газовой компоненты. Для больших амплитуд падающей ударной волны, наблюдается обратная зависимость: чем больше начальное газосодержание  $\alpha_{g0}$ , тем быстрее распространяется от-

раженная ударная волна, что связано с уменьшением влияния газосодержания и определяющим влиянием нелинейной сжимаемости жидкости. При превышении значения давления в проходящей волне  $p_1 \approx 20$  МПа становится заметным влияние нелинейной сжимаемости жидкости на увеличение скорости фронта отраженной ударной волны по сравнению с линейным приближением.

В третьей главе исследуются сильные ударные волны в газожидкостных средах в одномерной постановке на основе уравнений гидродинамики в односкоростном приближении с равным давлением фаз с условием адиабатического приближения для газовой фазы:

- законы сохранения массы 1 и 2 фазы:

$$\frac{\alpha_1}{\rho} \frac{\partial \rho_1^0}{\partial t} + \frac{\rho_1^0}{\rho} \frac{\partial \alpha_1}{\partial t} = -\frac{\rho_1}{\rho_0} \frac{\partial v}{\partial r} = b_1, \quad \frac{1 - \alpha_1}{\rho} \frac{\partial \rho_2^0}{\partial t} - \frac{\rho_2^0}{\rho} \frac{\partial \alpha_1}{\partial t} = -\frac{\rho_2}{\rho_0} \frac{\partial v}{\partial r} = b_2, \quad (1)$$

- законы сохранения импульса и энергии для смеси:

$$\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial r}, \quad (2)$$

$$\frac{\rho_1}{\rho} \left( \frac{\partial e_1}{\partial \rho_1^0} \right)_T \frac{\partial \rho_1^0}{\partial t} + \frac{\rho_2}{\rho} \left( \frac{\partial e_2}{\partial \rho_2^0} \right)_T \frac{\partial \rho_2^0}{\partial t} + \frac{\rho_1}{\rho} \left( \frac{\partial e_1}{\partial T_1} \right)_{\rho_1^0} \frac{\partial T_1}{\partial t} + \frac{\rho_2}{\rho} \left( \frac{\partial e_2}{\partial T_2} \right)_{\rho_2^0} \frac{\partial T_2}{\partial t} = -\frac{p}{\rho_0} \frac{\partial v}{\partial r}, \quad (3)$$

- условие равенства давлений фаз в дифференциальной форме:

$$\left( \frac{\partial p_1}{\partial \rho_1^0} \right)_T \frac{\partial \rho_1^0}{\partial t} - \left( \frac{\partial p_2}{\partial \rho_2^0} \right)_T \frac{\partial \rho_2^0}{\partial t} + \left( \frac{\partial p_1}{\partial T_1} \right)_{\rho_1^0} \frac{\partial T_1}{\partial t} - \left( \frac{\partial p_2}{\partial T_2} \right)_{\rho_2^0} \frac{\partial T_2}{\partial t} = 0. \quad (4)$$

- Условие адиабатичности для газовой фазы:

$$\frac{de_2}{dt} + p_2 \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{\rho_2^0} \right) = 0. \quad (5)$$

Здесь  $\rho_i^0$  и  $\rho_i = \rho_i^0 \cdot \alpha_i$  – текущая и приведенная плотности  $i$ -ой фазы,  $\rho_0$  – начальная средняя плотность среды,  $\alpha_i$  – объемное содержание и  $T_i$  – температура  $i$ -ой фазы ( $i=1$  – жидкая фаза,  $i=2$  – газовая),  $r$  – лагранжева координата,  $v$  – массовая скорость,  $p_i(\rho_i^0, T)$  и  $e_i(\rho_i^0, T)$  – давление и внутренняя энергия фаз, определяемые по широкодиапазонному уравнению состояния.

Система уравнений (1) – (5) с замыкающими соотношениями для давления и внутренней энергии, начальными и граничными условиями, в соответствии с моделируемой задачей, решалась на явной разностной сетке методом прямых (частиц) с использованием линейной и квадратичной искусственных вязкостей Неймана – Рихтмайера (М. Л. Уилкинс, 1967). Для исследования процесса распространения сильной ударной волны в пузырьковой жидкости начальные и граничные условия формулировались исходя из схемы эксперимента А. И. Сычева (2010):

$$t = 0: 0 \leq r \leq L_0: v(0, r) = 0, p(0, r) = p_0 = 0.1 \text{ МПа}, T_1 = T_2 = T_0 = 288 \text{ К},$$

$$\rho_1^0(0, r) = \rho_1^0(p_0, T_0), \rho_2^0(0, r) = \rho_2^0(p_0, T_0), \alpha_2(0, r) = \alpha_2(0). \quad (6)$$

$r = 0: v(t, 0) = v(t)$  – закон движения поршня;

$r = L_0: v(t, L_0) = 0$  – условие жесткой стенки.

Камера низкого давления ( $L_0 = 3.55$  м,  $L_1 = 0$  м) заполнена пузырьковой жидкостью с содержанием газа 0.04 (рис. 2). Ударные волны в трубе генерируются открытием пневматического затвора камеры высокого давления. С помощью датчиков давления на стенках трубы измеряется амплитуда падающих и отраженных ударных волн. На рис. 3 представлено сравнение экспериментальной осциллограммы давления падающей и отраженной ударной волны (линия 1) (А. И. Сычев, 2010) на расстоянии 0.535 м от торца ударной трубы.

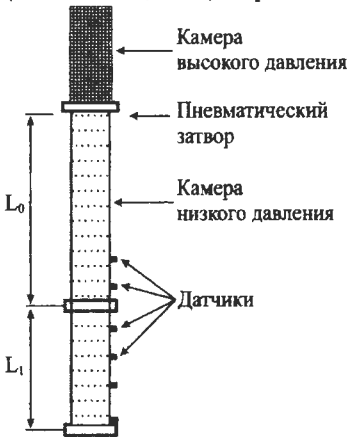


Рис. 2. Схема ударной трубы

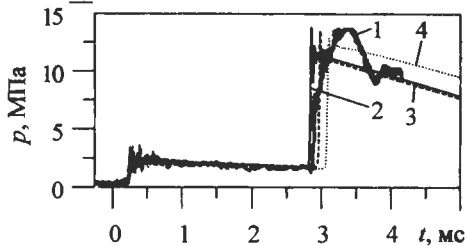


Рис. 3. Экспериментальная осциллограмма давления падающей и отраженной ударных волн (1 – вода-азот,  $\alpha_2 = 0.04$ ) и расчетные профили давления по адиабатической модели сжатия газа: 2 – азот, 3 – водяной пар; и 4 – однотемпературная модель (азот).

Сравнительный анализ приведенных на рис. 3 зависимостей показывает, что скорости ударного фронта и амплитуды давлений для падающих и отраженных от жесткой стенки ударных волн согласуются с экспериментальными данными при адиабатическом сжатии газовой фазы, как для азота (линия 2), так и для водяного пара (линия 3). Расчет по модели изотермического сжатия газовой фазы показывает меньшую скорость распространения ударной волны (линия 4) и большую амплитуду отраженной ударной волны по сравнению с экспериментальной осциллограммой (линия 1).

Исследование процесса взаимодействия ударной волны с преградой из водной пены проводится на основе уравнений (1) – (5) в однотемпературном при-

ближении ( $T_1 = T_2 = T$ ). Начальные и граничные условия задачи соответствуют экспериментам работы А. Britan et al., 2007:

$$t = 0 : 0 \leq r \leq L_0 + L_1 : v(0, r) = 0, p(0, r) = p_0 = 1 \text{ бар}, T_1 = T_2 = T_0 = 293 \text{ К}, \\ \rho_1^0(0, r) = \rho_1^0(p_0, T_0), \rho_2^0(0, r) = \rho_2^0(p_0, T_0), \alpha_2(0, r) = \alpha_2(0).$$

$$\alpha_1(0, r) = \begin{cases} 0, & 0 \leq r \leq L_0 \\ \alpha_{10}(0, r), & L_0 \leq r \leq L_0 + L_1 \end{cases} \quad (7)$$

$r = 0 : v(t, 0) = v(t)$  – закон движения поршня;

$r = L_0 + L_1 : v(t, L_0 + L_1) = 0$  – условие жесткой стенки.

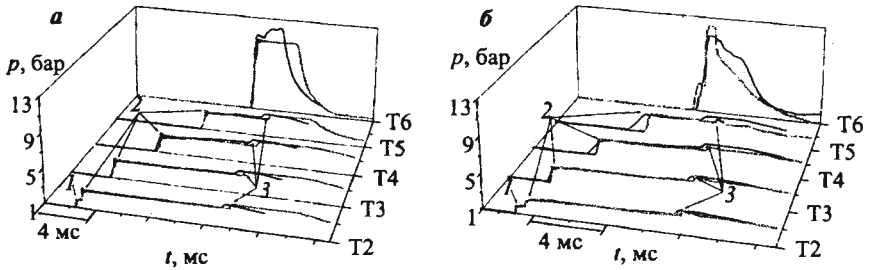


Рис. 4. Сравнение расчетных (светлые линии) и экспериментальных (темные линии) осциллограмм давления на датчиках в ударной трубе. Время синерезиса  $t_s = 5$  мин (а);  $t_s = 20$  мин (б).

Эксперименты (А. Britan et al., 2007) были проведены на ударной трубе (рис. 2), в которой камера низкого давления состояла из двух секций: первая заполнена воздухом ( $L_0 = 3$  м), вторая – пеной ( $L_1 = 0.363$  м). Начальное содержание воды в пене  $\alpha_{10} = 0.2$ . Координаты датчиков давления от начала тестовой секции следующие:  $x_{T_1} = -0.193$  м,  $x_{T_2} = -0.093$  м,  $x_{T_3} = 0.034$  м,  $x_{T_4} = 0.128$  м,  $x_{T_5} = 0.228$  м,  $x_{T_6} = 0.363$  м. В численных расчетах моделировались две серии экспериментов: ударное нагружение свежей (время синерезиса 5 мин) и отстоявшейся (время синерезиса 20 мин) пены. На рис. 4 (а) на датчике  $T_2$  первое повышение давления (обозначено 1) связано с приходом воздушной ударной волны. Взаимодействие воздушной волны с более плотным пенным слоем создает отраженную ударную волну и вызывает второе повышение давления на датчике  $T_2$ . Величина скачка зависит от плотности пены: чем меньше жидкости на ее поверхности, тем более слабой будет отраженная ударная волна. В образце пены волна значительно теряет скорость с 430 м/с до 45 м/с.

В процессе синерезиса структура пены становится неоднородной: содержание воды резко уменьшается в верхней части и увеличивается в нижней, образуется прослойка воды у твердой стенки. Для численного моделирования со-

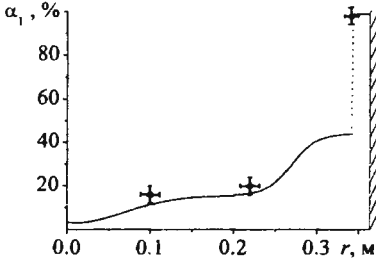


Рис. 5. Аппроксимация экспериментальных данных по содержанию воды в пене для расчетов (А. Britan, 2007). Время снерезиса  $t_S = 20$  мин (● – эксперимент).

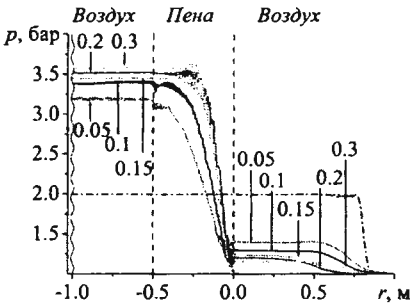


Рис. 6. Расчетные профили давления на фронте ударной волны при выходе из пены с различным содержанием воды  $\alpha_1$ .

держание воды в пене аппроксимировалось в соответствии с экспериментальными данными в нескольких точках столба пены (рис. 5). Из-за снижения водосодержания в верхних слоях пены отраженная ударная волна слабее, а проходящая – интенсивнее как по амплитуде, так и по скорости. По мере продвижения волны в пену, ее плотность растет, и скорость движения волны уменьшается.

На рис. 6 показано снижение амплитуды давления при прохождении волны амплитудой 2 бар через пенный слой толщиной 0.5 м, расположенный в воздухе. При отражении падающей волны от поверхности пены ее амплитуда возрастает, а амплитуда волны, прошедшей через пенный слой в воздушную область, меньше амплитуды волны перед вхождением в пену (штрихпунктирная линия на рис. 6). Варьирование начальной плотности пенного барьера показало, что возрастание начального  $\alpha_{10}$  улучшает демпфирующие способности пены, и волна, прошедшая через барьер, имеет все меньшую интенсивность.

В четвертой главе на основе двумерной с цилиндрической симметрией модели газожидкостной среды численно исследуется процесс формирования и распространения ударной волны в воде, в пузырьковых и пенных структурах.

Система уравнений сохранения для смеси в цилиндрических координатах (где  $z$  – ось симметрии,  $r$  – радиус) имеет вид (Р. И. Нигматулин, 1987):

– уравнения неразрывности фаз и движения смеси

$$\alpha_1 \frac{d\rho_1}{dt} + \rho_1 \frac{d\alpha_1}{dt} + \alpha_1 \rho_1 \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right] = 0, \quad (8)$$

$$\alpha_2 \frac{d\rho_2}{dt} + \rho_2 \frac{d\alpha_2}{dt} + \alpha_2 \rho_2 \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right] = 0,$$

$$\rho \frac{dv_r}{dt} + \frac{\partial p}{\partial r} = 0, \quad \rho \frac{dv_z}{dt} + \frac{\partial p}{\partial z} = 0, \quad (9)$$

– закон сохранения энергии для смеси:

$$\alpha_1 \rho_1 \frac{de_1}{dt} + \alpha_2 \rho_2 \frac{de_2}{dt} + p \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial r v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right] = 0. \quad (10)$$

Обозначения соответствуют введенным в одномерном случае (см. главу 3). Для численной реализации приведенной системы уравнений используется метод Уилкинса, в котором конечно-разностная схема строится на основе естественных аппроксимаций производных в дифференциальных уравнениях на лагранжевой сетке с модификацией, учитывающей двухфазность течения газожидкостной смеси.

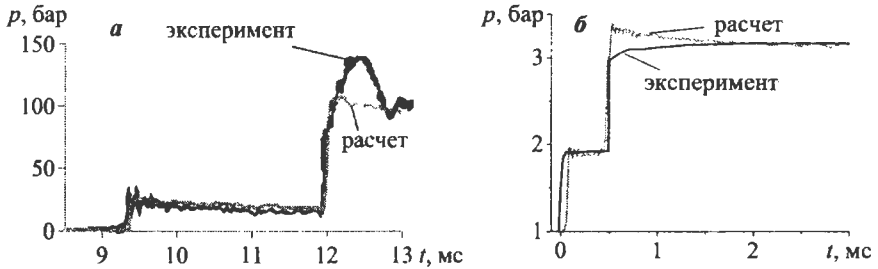


Рис. 7. Сравнение расчетных и экспериментальных осциллограмм давления в пузырьковой жидкости (а, Сычев А. И., 2010) и при взаимодействии ударной волны со слоем пены (б, А. Britan, 2007).

Проводится согласование тестовых расчетов с экспериментальными данными (рис. 7, описание приведенных экспериментов см. в постановках задач главы 3).

Для изучения влияния двумерных эффектов на динамику ударных волн в жидкости моделировалась следующая задача: в цилиндре с жесткими стенками

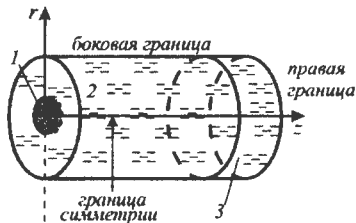


Рис. 8. Расчетная схема задачи в начальный момент времени.

в начальный момент времени в зоне 1 размером  $dz = dr = 0.2$  м задается импульс давления  $p_{0\max} = 1000$  бар (см. рис. 9 при  $t = 0$  мс), аппроксимируемый гладкой экспоненциальной функцией вида

$$p(r, z) = e^{-\alpha r^4 - \beta z^4} \quad (11)$$

Вся область заполнена либо водой, либо пузырьковой жидкостью с содержанием газа  $\alpha_{20} = 0.04$ . На рис. 9 показаны расчетные распределения давления в различные моменты времени в цилиндре, заполненном водой ( $\alpha_2 = 0$ ). При воздействии интенсивного локального импульса давления (рис. 9,  $t = 0$ ) с течением времени формируется ради-

ально распространяющаяся УВ, направленная к границам области. При этом в области  $l$  возникает зона с большим содержанием газовой фазы (до  $\alpha_2 = 0.6$ ). После частичного отражения от боковой границы УВ движется к оси симметрии, обходя зону  $l$  (рис. 9,  $t = 0.4$  мс). При достижении оси симметрии наблюдается усиление амплитуды давления до 400 бар. У правой границы амплитуда УВ возрастает до 430 бар ближе к оси симметрии  $z$  (рис. 9,  $t = 0.85$  мс).

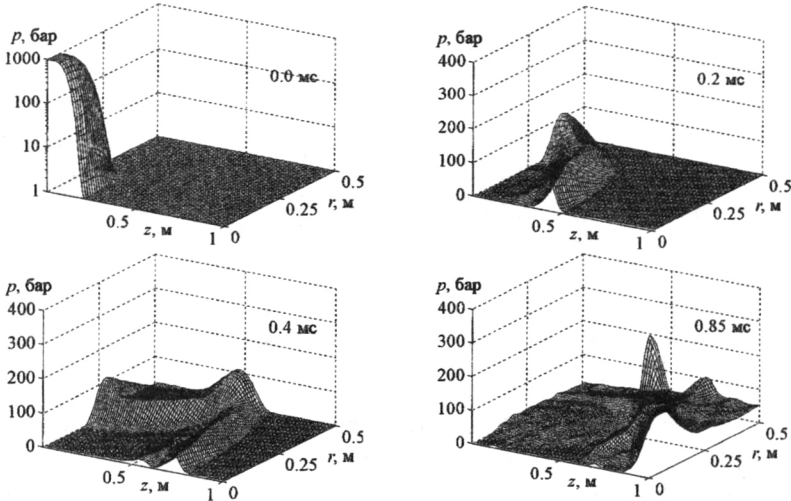


Рис. 9. Динамика волнового импульса в цилиндре с размерами  $r = 0.5$  м,  $z = 1$  м в моменты времени 0, 0.2, 0.4, 0.85 (мс), заполненного водой ( $\alpha_2 = 0$ ).

На следующем этапе моделировалось распространение УВ в цилиндре, заполненном пузырьковой жидкостью ( $\alpha_{20} = 0.04$ ). Первоначальный импульс давления (рис. 9,  $t = 0$ ) формирует радиальную УВ затухающей периодической структуры (см. рис. 10 при  $t = 1$  мс), но значительно меньшей амплитуды, чем при движении в чистой жидкости. При отражении от жестких границ амплитуда УВ достигает 10 бар ( $t = 3$  мс). Далее отраженная УВ обходит возникшую в зоне  $l$  газовую полость ( $\alpha_2 = 1$ ) и движется по сжатой среде ( $\alpha_2 = 0.025$ ) к оси симметрии  $z$  ( $t = 5$  мс). По мере приближения к правой границе волновой импульс приобретает форму, близкую к одномерной, далее происходит отражение от правой границы области, и УВ принимает квазиодномерный вид ( $t = 8$  мс).

Для исследования механизмов двумерной фокусировки ударных волн проводились расчеты по обжатию интенсивным волновым импульсом амплитудой 1000 бар по внешней границе цилиндрического объема размерами  $r = z = 1$  м (рис. 11). При расчетах рассматриваемой задачи в случае, когда цилиндрический объем заполнен водой, сформировавшиеся ударные волны имеют ампли-

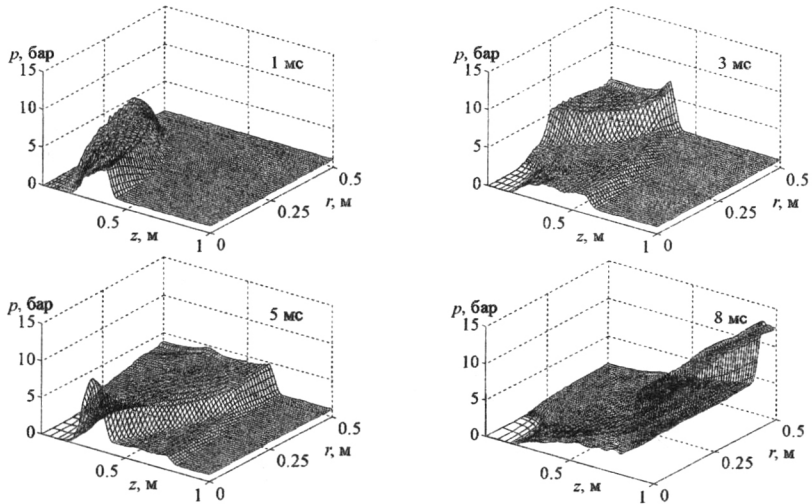


Рис. 10. Динамика волнового импульса в цилиндре с размерами  $r=0.5$  м,  $z=1$  м, заполненного пузырьковой жидкостью ( $\alpha_{20} = 0.04$ ) в моменты времени 1, 3, 5, 8 (мс).

туду порядка 600 бар и движутся к противоположным границам расчетной области, в зонах их взаимодействия образуется локальное повышение давления ( $t = 0.2$  мс). С приближением к центру амплитуда сходящихся импульсов возрастает ( $t = 0.5$  мс). В процессе отражения от осей симметрии  $r$  и  $z$  амплитуда повышается до  $\sim 5200$  бар ( $t = 0.55$  мс). После фокусировки отраженные волновые импульсы направлены к границам цилиндрического объема.

На рис. 12 представлены результаты численного моделирования воздействия аналогичного волнового импульса на цилиндрический объем, заполненный пузырьковой жидкостью с начальным содержанием газа  $\alpha_{20} = 0.04$ . Наличие пузырьков газа влияет на формирование волновых импульсов: их скорости и амплитуды значительно ниже, чем в воде, и с течением времени убывают с 320 бар до 130 бар (см.  $t = 0.2 - 0.6$  мс), трансформируясь в единый сходящийся фронт ( $t = 0.6$  мс). Наблюдается фокусировка ударных волн на пересечении осей  $r$  и  $z$ , где амплитуда давления возрастает до  $\sim 2000$  бар (см. рис. 12 при  $t = 1 - 1.1$  мс), приобретая максимальное значение, фиксируемое в центральной области цилиндра. В этой зоне фокусировки температура газа в пузырьках составляет  $T_2 \approx 2500$  К.

Для исследования эффективности пенной защиты моделировалось импульсное нагружение цилиндрического объема (рис. 8,  $r = z = 1$  м), в котором в начальный момент времени в зоне  $l$  ( $dz = dr = 0.2$  м) задавался импульс давления с амплитудой  $p_{0\max} = 20$  бар (рис. 13,  $t = 0$  мс), аппроксимируемый

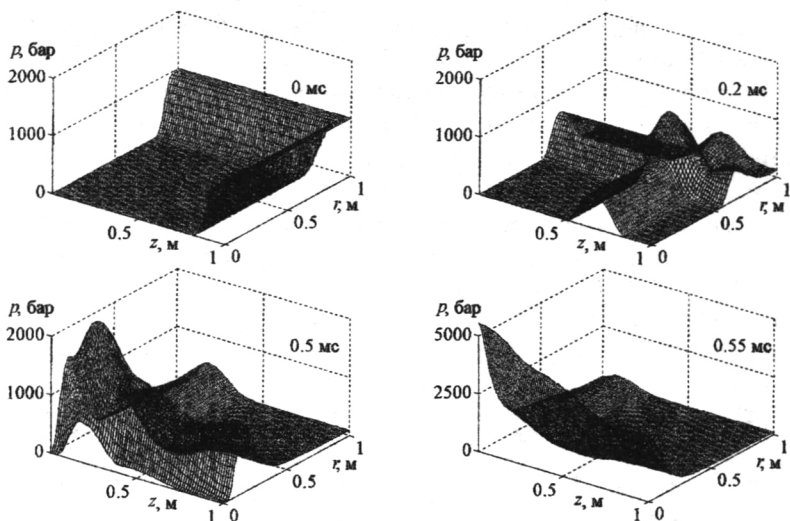


Рис. 11. Динамика поля давления при обжати волновым импульсом цилиндра  $r = z = 1$  м, заполненного водой,  $t = 0, 0.2, 0.5, 0.55$  (мс).

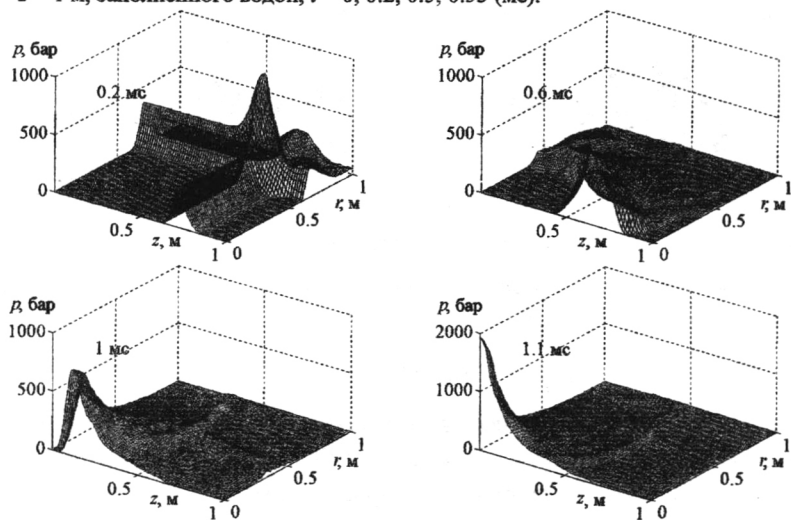


Рис. 12. Динамика поля давления при обжати импульсом давления цилиндра  $r = z = 1$  м, заполненного пузырьковой жидкостью ( $\alpha_{20} = 0.04$ ),  $t = 0.2, 0.6, 1, 1.1$  (мс).

функцией вида (11). Область 2 заполнена воздухом. В слое 3 толщиной 0.2 м располагалась пена ( $\alpha_{10} = 0.1$ ). Боковая и правая границы свободные, оси  $z$  и  $r$  – оси симметрии. В результате распада разрыва формируется ударная волна,

имеющая затухающую периодическую структуру, которая распространяется к границам области. При  $t = 3$  мс (рис. 13) волновой импульс достигает слоя пены. Происходит отражение волны сжатия от более плотной по сравнению с газом поверхности пены, что приводит к усилению амплитуды давления и к существенному уменьшению скорости распространения ударной волны в слое пены. Взаимодействие отраженной от пенного слоя волны со встречными импульсами ( $t = 5$  мс) приводит к блокировке УВ по направлению оси  $z$ , и движение волновых импульсов осуществляется вдоль границы пенного слоя.

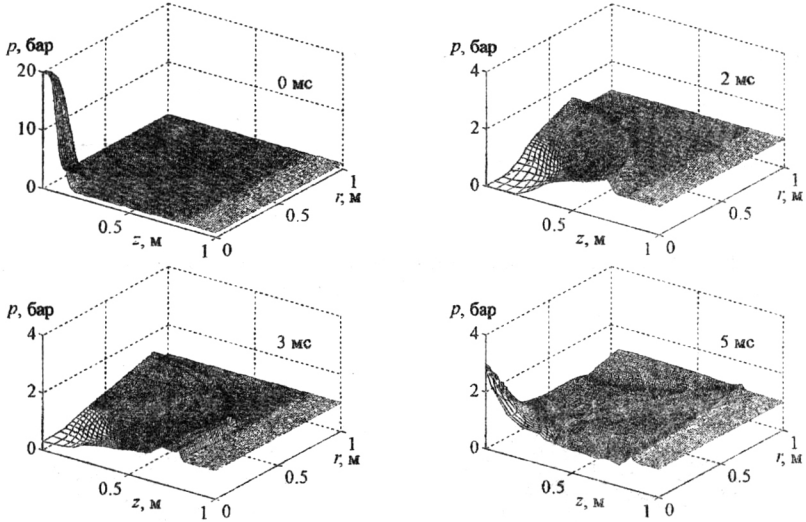


Рис. 13 Динамика волнового импульса в области, содержащей слой пены

В заключении кратко формулируются основные результаты, полученные в работе и выносимые на защиту.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ особенностей формирования сильных ударных волн в газожидкостных смесях с использованием алгебраических соотношений Рэнкина – Гюгонно. Разработан программный продукт, позволяющий проводить исследование параметров ударных волн в широком диапазоне давлений и газосодержаний, где важно учитывать нелинейную сжимаемость жидкой компоненты.
2. Построена модель ударно-волнового воздействия на двухфазную газожидкостную смесь в односкоростном двухтемпературном одномерном приближении с условием равенства давлений в фазах.

2.1. Выявлена зависимость эффективности барьеров из водных пен от ее начального газосодержания и неоднородности плотности пены, формирующейся в процессе ее старения.

3. Построена модель волнового воздействия на двухфазную газожидкостную среду в двумерной с цилиндрической симметрией постановке.

3.1 Получено значительное снижение амплитуды формирующейся волны с ростом начального газосодержания в смеси при воздействии интенсивного локального импульса давления на замкнутый объем, заполненный газожидкостной средой.

3.2. Выявлены зоны локальной фокусировки импульсов давления, амплитуда и длительность которых уменьшаются с увеличением объемного содержания газовой фазы в смеси для задачи обжатия цилиндрического объема.

3.3. Установлено, что пенный слой блокирует прохождение воздушного волнового импульса и «направляет» его вдоль границы пенной преграды.

#### ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Работы, опубликованные в журналах, рекомендованных ВАК РФ:*

1. Болотнова Р. Х., Галимзянов М. Н., Агишева У. О. Моделирование процессов взаимодействия сильных ударных волн в газожидкостных смесях // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2011. – № 2. – С. 3 – 14.

2. Галимзянов М. Н., Болотнова Р. Х., Агишева У. О., Бузина В. А. Гидродинамика ударных волн и вскипающих потоков в пузырьковых жидкостях // Вестник Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4. – Ч. 3. – С. 700 – 701.

3. Bolotnova R. Kh., Galimzianov M. N., Topolnikov A. S., Agisheva U. O. et al. Nonlinear Effects in Bubbly Liquid with Shock Waves // World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2012. – V. 68 – P. 1992 – 1999.

4. Агишева У. О., Болотнова Р. Х., Бузина В. А., Галимзянов М. Н. Параметрический анализ режимов ударно-волнового воздействия на газожидкостные среды // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. – 2013. – № 2. – С. 15 – 28. (Agisheva U. O., Bolotnova R. Kh., Buzina V. A., Galimzianov M. N. Parametric Analysis of the Regimes of Shock-Wave Action on Gas-Liquid Media // Fluid Dynamics. – 2013. – V. 48. – № 2. – P. 151 – 162).

5. Агишева У. О. Воздействие ударных волн на пузырьковые и пенные структуры в двумерных осесимметричных объемах // Вестник Башкирского университета. – 2013. – Т. 18. – № 3. – С. 623 – 627.

*В других изданиях:*

6. Агишева У. О. Расчет параметров сильных ударных волн в пузырьковой жидкости // Сборник тезисов, материалы Семнадцатой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ – 17. г. Екатеринбург). – 2011. – С. 511 – 512.

7. Агишева У. О. Определение параметров ударных волн в газожидкостной смеси // Сборник трудов Всероссийской научной конференции с международным участием «Дифференциальные уравнения и их приложения». – 2011. – С. 227 – 230.

8. Агишева У. О., Болотнова Р. Х., Галимзянов М. Н. Исследование ударно-волновых процессов в пузырьковой жидкости при взаимодействии с преградой // Сборник трудов Института механики УНЦ РАН. – 2011. – Выпуск 8. – С. 17 – 24.

9. Болотнова Р. Х., Агишева У. О. Особенности распространения ударных волн в водных пенах с неоднородной плотностью // Сборник трудов Института механики УНЦ РАН. – 2012. – Выпуск 9. – Ч. 1. – С. 41 – 46.

10. Нигматулин Р. И., Топольников А. С., Болотнова Р. Х., Агишева У. О., Бузина В. А. Наномасштабная кумуляция энергии при волновом воздействии на пузырьковые системы. – М.: 2012. – 134 с. – отчет о НИР ИМех УНЦ РАН 2009-2011. Деп. ВНИТИ №02 2012 58553.

11. Агишева У. О. Моделирование процесса распространения ударной волны в области, содержащей слой пены // Волны и вихри в сложных средах: Международная школа молодых ученых (г. Москва). – 2012. – С. 11 – 14.

12. Агишева У. О. Численное исследование двумерных осесимметричных ударно-волновых течений пузырьковой жидкости в ограниченном объеме // Тезисы докладов всероссийской молодёжной научно-практической конференции «Актуальные вопросы науки и образования», (г. Уфа). – 2013. – С. 88.

13. Bolotnova R. Kh., Agisheva U. O. Numerical investigation of two-dimensional axisymmetric bubbly liquid shock wave flow in bounded volume // Fluxes and Structures in Fluids: International conference, Saint Petersburg. – 2013. – P. 35 – 38.

*Регистрации программных продуктов*

14. Болотнова Р. Х., Агишева У. О. Программный продукт для определения параметров ударных волн в газожидкостной смеси. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2013618165, 2013 // Правообладатель: ФГБОУ ВПО Башкирский государственный университет // Официальный бюллетень Реестра программ для ЭВМ. Москва. Роспатент. 02.09.2013.

**АГИШЕВА Ульяна Олеговна**

**ОСОБЕННОСТИ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ  
В ГАЗОЖИДКОСТНЫХ СРЕДАХ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

*Лицензия на издательскую деятельность  
ЛР № 021319 от 05.01.99 г.*

Подписано в печать 20.11.13 г. Формат 60х84/16.  
Усл. печ. л. 1,15. Уч.-изд. л. 1,2.  
Тираж 100 экз. Заказ 520.

*Редакционно-издательский центр  
Башкирского государственного университета  
450074, РБ, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32.*

*Отпечатано на множительном участке  
Башкирского государственного университета  
450074, РБ, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32.*

102