

На правах рукописи

ЛЕПИХИН СЕРГЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

**ВОЛНОВЫЕ ТЕЧЕНИЯ ПУЗЫРЬКОВОЙ ЖИДКОСТИ
В КАНАЛАХ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы



АВТОРЕФЕРАТ
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Тюмень – 2007

Работа выполнена на кафедре прикладной математики и механики Бирской государственной социально-педагогической академии

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Владислав Шайхулагзамович
Шагапов

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Анвар Гумерович Кутушев

доктор физико-математических наук,
профессор Сергей Иванович Лежнин

Ведущая организация: Башкирский государственный университет

Защита состоится « 30 » октября 2007 г. в 16⁰⁰ час на заседании диссертационного совета ДМ 212.274.09 в Тюменском государственном университете по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская, д.15^А.

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

Автореферат разослан « 29 » сентября 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук



Татосов А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Широкое распространение газожидкостных пузырьковых систем в природе и их интенсивное применение в современной технике, обуславливает повышенный интерес исследователей к классу задач, связанных с проблемами механики пузырьковых сред. В последнее время этот интерес возрастает в связи с перспективами развития новых технологий, связанных в частности с возможностью реализации газофазных высокотемпературных плазмохимических процессов в изначально холодной пузырьковой жидкости и получением супервысоких «рабочих» давлений, посредством воздействия на пузырьковые среды в ограниченных емкостях ударными волнами или пропусканьем газожидкостных систем через сопла. В частности, в настоящее время имеются экспериментальные результаты (Р. Талеярхан, Р.И. Нигматулин, Р. Лэхи и др.) в которых показана возможность осуществления высокотемпературных превращений в парогазожидкостных системах, сопровождаемых процессами излучения, при периодическом воздействии акустическими волнами. В лабораторных условиях (Галимов Э.М. и др.) при истечении бензола через сопло, сопровождаемого кавитацией, установлено образование твердых частиц, содержащих алмаз. Также гидродинамические эффекты, связанные с реализацией высоких давлений и температур в пузырьках, могут быть использованы для воздействия на микроорганизмы в ряде технологических процессов пищевой промышленности и здравоохранении, к примеру, в процессе холодной пастеризации молока.

Большой цикл исследований по моделированию процессов в многофазных системах, в частности по изучению ударных и детонационных волн в пузырьковых жидкостях выполнен школой Р.И. Нигматулина (Губайдуллин А.А., Ивандаевым А.И., Шагаповым В.Ш., Гималтдиновым И.К. и др.). Существенный вклад в экспериментальное и теоретическое исследование взрывных и детонационных процессов в газожидкостных средах, гидравлики двухфазных потоков сделан представителями Института гидродинамики им. Лаврентьева (Кедринским В.К., Жданом С.А., Пинаевым А.В., Николаевым Ю.А., Сычевым А.И.) и школой Накорякова В.Е. (Донцовым В.Е., Кузнецовым В.В., Покусаевым Б.Г., Лежниним С.И. и др.) в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН.

Таким образом, изучение закономерностей волновых течений с экстремальными давлениями и температурами в пузырьках парогазожидкостной смеси представляется интересным с точки зрения широкого практического применения и поэтому является **актуальным**. Кроме этого актуальность исследований связана с анализом возможных аварийных ситуаций из-за толчков и ударов при хранении и транспортировке гетерогенных сред в емкостях различной геометрической формы и размерами; для усиления ударов при

технологических процессах, связанных с воздействием высокого давления; для изучения возможности инициирования газожидкостных и высокодавленческих превращений посредством воздействия на химически активные пузырьковые жидкости импульсами умеренной амплитуды.

Цели работы. Теоретическое исследование возможности реализации высоких давлений и температур в газовой фазе при стационарном течении пузырьковой жидкости через сопло. Анализ влияния параметров газожидкостной смеси (радиуса, объемного содержания пузырьков, определяющих состав объемного расхода жидкости, подаваемого в сопло) и содержания пара в газовой фазе на величины пиковых температур и давлений внутри пузырьков.

Исследование динамики нелинейных волн в пузырьковой жидкости, находящейся в каналах переменного сечения, для анализа возможности создания в волновом поле зон с высоким давлением.

Изучение возможности инициирования детонационных волн в каналах переменного сечения импульсами давления, амплитуда которых недостаточна для возбуждения детонации на их входе. Анализ влияния объемного газосодержания и геометрической формы канала на возникновение и распространение детонационных волн.

Научная новизна. Автором теоретически изучена и показана возможность реализации высоких давлений и температур в газовой фазе при стационарном течении пузырьковой жидкости через сопло. Анализировано влияние параметров газожидкостной смеси (радиуса, объемного содержания пузырьков, определяющих состав объемного расхода жидкости, подаваемого в сопло) и содержания пара в газовой фазе на картину течения.

Рассмотрена динамика нелинейных волн в конусообразных сужающихся каналах с закрытым дном, заполненных пузырьковой жидкостью. Изучено влияние состава и параметров смеси (объемного содержания газовой фазы и размера пузырьков), а также геометрических характеристик каналов на эволюцию волн давления.

На основе анализа динамики нелинейных волн показана возможность инициирования детонационных волн в каналах с начальным сужающимся участком импульсами давления малой амплитуды. Обнаружено явление возникновения в канале двух детонационных волн, распространяющихся вдоль канала в противоположных направлениях, выявлено условие его осуществления. В сужающихся каналах с закрытым дном показано появление «отраженной детонации», заключающейся в возникновении устойчивой детонационной волны при отражении от дна канала.

Достоверность. Достоверность результатов исследований основана на корректном применении уравнений механики пузырьковой жидкости, проведении тестовых расчетов, обусловлена совпадением полученных результатов в предельных частных случаях с результатами других исследователей, непротворочивости решений задач общим гидродинамическим представлением.

Практическая ценность. Результаты, полученные в диссертационной работе, могут быть расширены для создания теоретических основ гидродинамических закономерностей истечения пузырьковой жидкости через сопло. Используются для анализа взрывобезопасности пузырьковых гетерогенных систем и интенсивности воздействия детонационных волн на элементы конструкций.

Апробация работы. Основные результаты, полученные в диссертации, докладывались на следующих конференциях и научных школах:

- на Школе-семинаре «Актуальные проблемы механики и физики» под руководством акад. Р.И. Нигматулина (г. Бирск, БирГПИ, 17 марта 2005 г.);
- на Международной уфимской зимней школе-конференции по математике и физике с участием студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Уфа, БашГУ, 30 ноября – 6 декабря 2005 г.);
- на IV Региональной научно-методической конференции «ЭВТ в обучении и моделировании» (г. Бирск, БирГСПА, 16 – 17 декабря 2005 г.);
- на XII Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (г. Новосибирск, НГУ, 23 – 29 марта 2006 г.);
- на Научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука в школе и ВУЗе» (г. Бирск, БирГСПА, 16 – 22 апреля 2006 г., 15 – 20 апреля 2007 г.);
- на VI Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ-2006) (г. Санкт-Петербург, СПбГПУ, 26 июня – 1 июля 2006 г.);
- на XV Зимней школе по механике сплошных сред (г. Пермь, ИМСС УрО РАН, 26 февраля – 3 марта 2007 г.);
- на VI Всероссийской научно-методической конференции «ЭВТ в обучении и моделировании» (г. Бирск, БирГСПА, 20 – 21 апреля 2007 г.);
- на XIII Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (г. Ростов-на-Дону – Таганрог, ЮФУ, 20 – 26 апреля 2007 г.);
- на Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР – 2007» (г. Томск, ТУСУР, 3 – 7 мая 2007 г.).

Кроме того, результаты работы докладывались на семинарах Проблемной лаборатории математического моделирования и механики сплошных сред под руководством профессоров С.М. Усманова и В.Ш. Шагапова.

Публикации. Основной материал диссертации опубликован в 13 работах. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы.

Объем диссертации составляет 103 страницы, включая 20 рисунков и список литературы, состоящий из 98 наименований.

Во введении отмечена практическая и научная актуальность проблем, рассмотренных в диссертации. Сформулирована цель, основные задачи исследования, кратко изложена структура диссертации.

В первой главе рассматривается процесс стационарного течения пузырьковой жидкости через сопло. Анализируется возможность реализации высоких давлений и температур в газовой фазе в изначально холодной пузырьковой системе, вследствие развития нелинейных колебаний пузырьков в расширяющейся части сопла, вблизи минимального сечения. Исследуется влияния параметров газожидкостной смеси (радиуса, объемного содержания пузырьков, определяющих состав объемного расхода жидкости, подаваемого в сопло) и содержания пара в газовой фазе на картину течения.

В начале главы представлен краткий анализ теоретических и экспериментальных исследований, посвященных изучению газожидкостных пузырьковых потоков в каналах и соплах.

Далее в квазиодномерном приближении формулируется задача о стационарном течении пузырьковой жидкости в сопле. В соответствии с принимаемыми допущениями (отсутствует массообмен между пузырьками и жидкостью, температура жидкости постоянна, отсутствуют дробление и слипание пузырьков, вязкость и теплопроводность существенны лишь в процессе межфазного взаимодействия, в частности при пульсациях пузырьков, силами трения потока о стенки канала пренебрегаем) записана система основных уравнений в виде:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dz} [\rho_l^0 (1 - \alpha_g) v S] &= 0, & \frac{d}{dz} (n v S) &= 0, \\ \rho_l^0 (1 - \alpha_g) v \frac{dv}{dz} &= - \frac{dp_l}{dz}, & v \frac{dp_g}{dz} &= - \frac{3\gamma p_g}{a} w - \frac{3(\gamma - 1)}{a} q, & (1) \\ a w \frac{dw}{dz} + \frac{3}{2} w^2 + 4\nu^{(v)} \frac{w}{a} &= \frac{p_g - p_l - 2\sigma/a}{\rho_l^0}, & v \frac{da}{dz} &= w, \end{aligned}$$

где ρ_l^0 , α_g , v , p_l , p_g , n , a , w , $\nu^{(v)}$, γ , σ , q – соответственно плотность жидкости, объемное газосодержание, скорость, давление в жидкости и в пузырьках газа, число и радиус пузырьков, скорость радиального движения, коэффициент кинематической вязкости, показатель адиабаты для газа, коэффициент поверхностного натяжения, интенсивность теплообмена или тепловой поток от газа к жидкости, отнесенный к единице площади межфазной поверхности, $S = S(z)$ – площадь поперечного сечения сопла.

Интенсивность межфазного теплообмена принимается в виде

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

где $T_0 = const$ – температура жидкости, Nu – число Нуссельта.

Числа Нуссельта и Пекле задаются в виде:

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

где $\nu^{(T)} = \lambda_g / c_g \rho_g^0$, λ_g , c_g – коэффициент температуропроводности, коэффициент теплопроводности и теплоемкость газа соответственно.

Жидкость принимается несжимаемой, газ калорически совершенным:

$$\rho_l^0 = const, \quad p_g = \rho_g^0 B T_g.$$

В соответствии с постановкой задачи приводится преобразование основной системы уравнений (1) к виду, удобному для численного анализа:

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dz} &= \frac{3\alpha_g w}{a} - \frac{v}{S} \frac{dS}{dz}, & \frac{dp_l}{dz} &= \rho_l^0 (\alpha_g - 1) v \left(\frac{3\alpha_g w}{a} - \frac{v}{S} \frac{dS}{dz} \right), \\ \frac{dp_g}{dz} &= -\frac{1}{av} [3\gamma p_g w + 3(\gamma - 1)q], & (2) \\ \frac{dw}{dz} &= \frac{1}{av} \left(\frac{p_g - p_l - 2\sigma/a}{\rho_l^0} - \frac{3}{2} w^2 - 4\nu^{(v)} \frac{w}{a} \right), & \frac{da}{dz} &= \frac{w}{v}, \\ \alpha_g &= \alpha_{g0} \left(\frac{a}{a_0} \right)^3 \frac{v_0 S_0}{vS} \end{aligned}$$

Кратко рассмотрена методика решения системы (2) методом Рунга-Кутта 4-го порядка точности с автоматическим выбором шага аппроксимации.

На основе численного анализа показана возможность развития интенсивных нелинейных колебаний пузырьков в сопле и возникновение в них высоких давлений и температур.

На рис. 1 представлены результаты расчетов для течения водовоздушной пузырьковой смеси в сопле кругового сечения. Геометрические размеры

сопла (рис. 1е) следующие: длина 15 см, диаметры концов 3,57 см, расстояние от входного до минимального сечения сопла 2,3 см, диаметр минимального сечения 2,52 см. Для параметров на входном сечении сопла ($z = 0$) приняты следующие величины: скорость течения $v_0 = 11,4$ м/с, давления в жидкости и в газовой фазе $p_{l0} = p_{g0} = 0,2$ МПа, температура $T_{g0} = 300$ К, радиус пузырьков $a_0 = 10^{-4}$ м, объемное газосодержание $\alpha_{g0} = 10^{-4}$.

При истечении через сопло пузырьковой жидкости, в ней, вследствие уменьшения давления в жидкости в сужающейся части сопла (рис. 1а), и инерционного радиального движения пузырьков в области минимального сечения, могут развиваться нелинейные колебания пузырьков (рис. 1в). Интенсивность колебаний определяется характеристиками газожидкостной смеси и величиной минимального давления, достигаемого в горловине сопла.

Уменьшение давления жидкости в сужающейся части сопла приводит к росту пузырьков. В горловине сопла давление в жидкой фазе достигает своего минимального значения и далее начинает увеличиваться в расширяющейся части сопла. При этом пузырьки газа, растущие в сужающейся части сопла, в минимальном сечении «проскакивают» равновесное состояние и, продолжая расти вследствие инерционного радиального движения пузырьков, достигают максимальных размеров в расширяющейся части сопла вблизи горловины. Под действием возрастающего давления в жидкости пузырьки, в расширяющейся области, резко начинают сжиматься. В процессе схлопывания пузырьки вновь «проскакивают» равновесное состояние, уменьшаясь до минимальных размеров с пиковыми значениями давления и температуры газа в пузырьках. В последующем происходит новое расширение пузырьков, обусловленное разностью давлений газа в пузырьках и в жидкости в момент наибольшего сжатия. В дальнейшем эти нелинейные колебания пузырьков в расширяющейся части сопла за счет диссипации из-за теплообмена и вязкости жидкости постепенно затухают (рис. 1в). При этом, как показывает расчет, в процессе схлопывания пузырьков, средние значения давления и температуры газа в пузырьках достигают величин, намного превышающих начальные значения (рис. 1б, г).

Также проанализировано влияние параметров газожидкостной смеси (радиуса, объемного содержания пузырьков, определяющих состав объемного расхода жидкости, подаваемого в сопло) на картину «пиковых» температур и давлений в газовой фазе. Показано, что наиболее высокие температуры и давления газа, реализуются в крупнодисперсных пузырьковых жидкостях, вследствие снижения межфазной теплопередачи при пульсациях. При этом характерная ширина зоны колебания пузырьков в сопле, определяется начальными размерами пузырьков и расширяется с увеличением объемного содержания газовой фазы смеси.

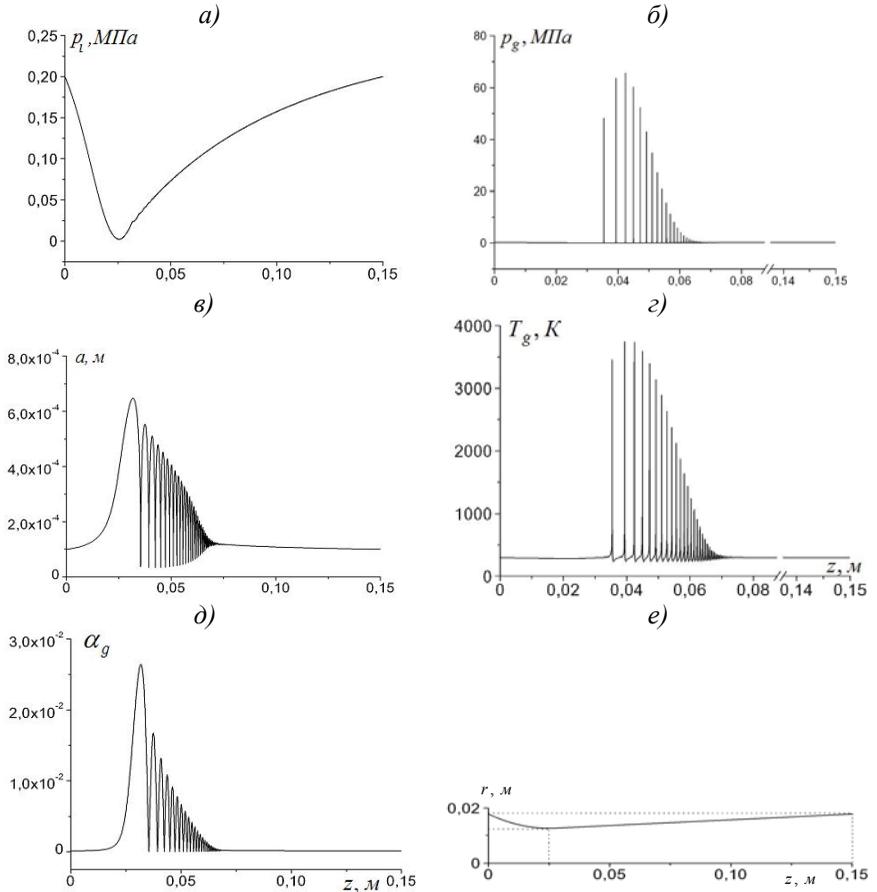


Рис. 1. Распределение основных параметров двухфазного потока в сопле: давления в жидкости (а) и в газовой фазе (б), радиуса пузырьков (в), объемного газосодержания (д) температуры газа (в); профиль сопла (е).

Исследовано влияние фазовых переходов на картину течения. Дополнены основные уравнения с учетом содержания в пузырьках пара жидкости и массообменных процессов между фазами.

Для всей газовой смеси, состоящей из двух компонент – инертного газа, не участвующего в фазовых переходах, и пара окружающей пузырьки жидкости – уравнение состояния запишем в виде:

$$\frac{1}{\rho_g^0} = \frac{RT_g}{p_g} \left(\frac{k_v}{\mu_v} + \frac{k_g}{\mu_g} \right),$$

где ρ_g^0 – истинная плотность газовой смеси, k_i ($i = v, g$) – среднemasсовые концентрации пара и инертного газа.

Пренебрегая изменением массы жидкости за счет фазовых переходов, уравнение неразрывности для жидкости, а также уравнение сохранения числа пузырьков и импульсов запишем в таком же виде, как для случая газовых пузырьков. В уравнении Релея-Ламба учтем межфазный массообмен:

$$v \frac{da}{dz} = w + \frac{j}{\rho_l^0},$$

где для интенсивности испарения примем:

$$j = - \frac{\rho_{g(a)}}{1 - k_{v(a)}} D Sh \frac{k_v - k_{v(a)}}{2a},$$

где $\rho_{g(a)}$, $k_{v(a)}$ – соответственно плотность газовой смеси и массовая концентрация на межфазной поверхности, D – коэффициент диффузии, Sh – число Шервуда.

Уравнение для давления в газовой фазе можно получить из уравнения для изменения внутренней энергии газовой смеси в пузырьке:

$$v \frac{de}{dz} = -4\pi a^2 p_g w_{g(a)} + 4\pi a^2 q_g + 4\pi a^2 j c_{g(a)} T_a, \quad (e = m_g c_g T_g)$$

где c_g – удельная теплоемкость газовой смеси при постоянном объеме. Дополнительный нижний индекс (a) относится к параметрам на межфазной границе.

После некоторых преобразований, уравнение для давления парогазовой смеси в пузырьках приводится к виду:

$$\begin{aligned} \frac{dp_g}{dz} = & \frac{3(\gamma - 1)}{av} \left[-\frac{\gamma p_g}{\gamma - 1} \left(w + \frac{j}{\rho_l^0} \right) + q_g + \right. \\ & \left. + (B_a + c_{g(a)}) T_a j - (1 - k_v) \left(\frac{c_{gv} - c_{gg}}{c_g} - \frac{B_v - B_g}{B} \right) c_g T_g j \right], \end{aligned}$$

где c_{gi} и B_i ($i = g, v$) – удельная теплоемкость и приведенная газовая постоянная соответственно для инертной и паровой составляющей газовой смеси.

Уравнения для переменной плотности парогазовой смеси и концентрации пара следуют из закона сохранения массы для смеси в пузырьке и ее газовой составляющей:

$$v \frac{dm_g}{dz} = 4\pi a^2 j, \quad v \frac{d}{dz} [m_g (1 - k_v)] = 0, \quad \left(m_g = \frac{4}{3} \pi a^3 \rho_g^0 \right).$$

Отсюда можно получить:

$$\frac{d\rho_g^0}{dz} = \frac{3(j - \rho_g^0 w)}{av}, \quad \frac{dk_v}{dz} = \frac{3(1 - k_v)}{\rho_g^0 av} j.$$

На границе фазового перехода, зададим условие баланса тепла

$$q_l - q_g = j\ell,$$

где ℓ – удельная теплота парообразования. Тепловые потоки, к межфазной поверхности определяются конечными соотношениями

$$q_l = Nu_l \lambda_l \frac{T_l - T_a}{2a}, \quad q_g = Nu_g \lambda_g \frac{T_a - T_g}{2a}.$$

Для замыкания системы необходимо задать значения концентрации пара и температуры на межфазной поверхности. Из уравнения баланса тепла получаем выражение для температуры:

$$T_a = \frac{\lambda_l Nu_l T_l + \lambda_g Nu_g T_g - 2aj\ell}{\lambda_l Nu_l + \lambda_g Nu_g}.$$

Считая давление внутри пузырька однородным по всему объему, а парциальное давление пара на границе пузырька $p_{gv(a)}$ равным давлению насыщенного пара $p_s(T_a)$, соответствующего температуре газа на межфазной границе ($p_{gv(a)} = p_s(T_a)$), из уравнений состояния, записанных для пара и газовой смеси на межфазной поверхности

$$\rho_{v(a)} B_v T_a = p_s(T_a), \quad \rho_{g(a)}^0 B_a T_a = p_g,$$

после некоторых преобразований получим уравнение для концентрации пара

$$k_{v(a)} = \frac{B_g}{B_g + \left(\frac{p_g}{p_s(T_a)} - 1 \right) B_v}.$$

На рис. 2. представлено распределение основных параметров газожидкостного потока в сопле с учетом и без учета содержания пара в пузырьках. Скорость смеси на входе сопла $v_0 = 11,36$ м/с, остальные параметры пузырьковой жидкости и размеры сопла такие же, как и на рис 1. Кривые 1 соответствует пузырьковой жидкости с чисто газовыми пузырьками, кривые 2 – пузырьковой жидкости с парогазовыми пузырьками.

Расчеты показывают, что учет межфазного массообмена оказывает двоякое воздействие: во-первых, происходит более сильное первоначальное расширение пузырьков в области минимального сечения сопла, поскольку пузырьки становятся более мягкими, вследствие интенсивного испарения жидкости внутрь пузырьков, приводящего к уменьшению сопротивляемости пузырьков расширению (рис.2а). При этом масса парогазовой смеси в пузырьках может увеличиваться в несколько раз по сравнению

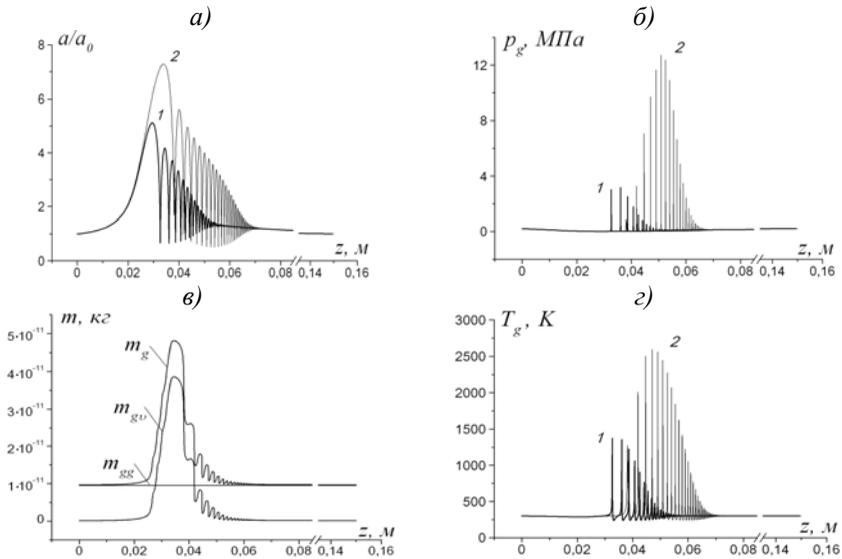


Рис. 2. Распределение основных параметров двухфазного потока в сопле: безразмерного радиуса пузырьков (а), давления и температуры в пузырьках (б, г); массы газовой смеси и ее составляющих (в).

с первоначальной (рис. 2в). Во-вторых, при последующем быстром сжатии пузырьков, это набранное значительное количество пара, не успевает конденсироваться обратно, что в свою очередь способствует значительному демпфированию процесса сжатия пузырьков. Поэтому в парогазовых пузырьках наиболее высокие значения пиковых давлений и температур реализуются не при первых схлопываниях, как это имеет место в пузырьковой жидкости при отсутствии фазовых переходов, а при последующих колебаниях, когда масса парогазовой смеси в пузырьках уменьшается (рис. 2б, г). Причем влияние пара, согласно численному анализу, начинает существенно проявляться при температуре пузырьковой системы порядка комнатной ($\sim 25^{\circ}\text{C}$) и оставаться незначительным при более низких температурах.

Вторая глава посвящена динамике нелинейных волн давления в каналах переменного сечения, заполненных неподвижной пузырьковой жидкостью.

Приводится обзор теоретических и экспериментальных работ по нелинейным волнам в пузырьковой жидкости.

Выписана система определяющих уравнений для описания динамики волн давления в каналах переменного сечения с пузырьковой жидкостью.

Рассмотрены основные приближения, используемые при формулировке задачи.

При описании движения пузырьковой жидкости полагается: в каждом элементарном объеме все пузырьки сферические и одного радиуса, вязкость и теплопроводность существенны лишь в процессе межфазного взаимодействия, в частности при пульсациях пузырьков, отсутствуют дробление и слипание пузырьков.

На основе приведенных допущений для пузырьковой жидкости записывается система основных уравнений в односкоростном приближении в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_i S)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_i v S)}{\partial x} &= 0 \quad (i = l, g), & \frac{\partial(n S)}{\partial t} + \frac{\partial(n v S)}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial(\rho v S)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v^2 S)}{\partial x} &= -S \frac{\partial p_l}{\partial x}, \\ \left(\alpha_l + \alpha_g = 1, \quad \alpha_g = \frac{4}{3} \pi a^3 n, \quad \rho_i = \rho_i^0 \alpha_i, \quad \rho = \rho_l + \rho_g \right) & \quad (3) \\ w &= w_R + w_A, \\ a \frac{dw_R}{dt} + \frac{3}{2} w_R^2 + 4\nu^{(v)} \frac{w_R}{a} &= \frac{p_g - p_l}{\rho_l^0}, & w_A &= \frac{p_g - p_l}{\rho_l^0 C_l \alpha_l^{1/3}}, \\ v \frac{dp_g}{dz} &= -\frac{3\gamma p_g}{a} w - \frac{3(\gamma - 1)}{a} q. \end{aligned}$$

Интенсивность межфазного теплообмена задается в таком же виде, который принят в первой главе.

Жидкость примем акустически сжимаемой, а газ калорически совершенным:

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

Для численного решения задачи представлен переход от переменных Эйлера к переменным Лагранжа, поскольку в лагранжевых переменных проведение численных расчетов является более удобным (в качестве лагранжевых переменных берутся начальные эйлеровы координаты).

Описан принцип построения разностной схемы для аппроксимации системы уравнений, записанной в лагранжевых переменных на равномерной шахматной сетке.

Представлены результаты расчетов для динамики волны давления ступенчатого вида в сужающемся конусообразном канале с закрытым дном. Изучено влияние параметров пузырьковой жидкости (радиуса и объемной концентрации пузырьков), а также неоднородного распределения газосодержания на величину всплесков давления, возникающих на дне канала.

На рис. 3 приведены расчетные значения давлений, реализующихся на дне каналов с разной степенью сужения (кривая 1 – цилиндрический канал, кривая 2 и 3 – сужающиеся, в 3 и 5 раз соответственно, каналы), при отражении от их волны давления типа ступенька, в зависимости от параметров газожидкостной смеси. Общие геометрические параметры каналов: длина 1 м, диаметр входного сечения 0,4 м. Начальные параметры пузырьковой жидкости: $p_{i0} = p_{g0} = 0,1$ МПа, $T_0 = 300$ К, для рис. 3а – $\alpha_{g0} = 10^{-2}$, для рис. 3б – $\alpha_0 = 10^{-3}$ м. Амплитуда волны, инициированной на входе каналов, в обоих случаях равна $\Delta p = 0,1$ МПа. Здесь в качестве жидкости принята вода, в качестве газовой фазы – воздух.

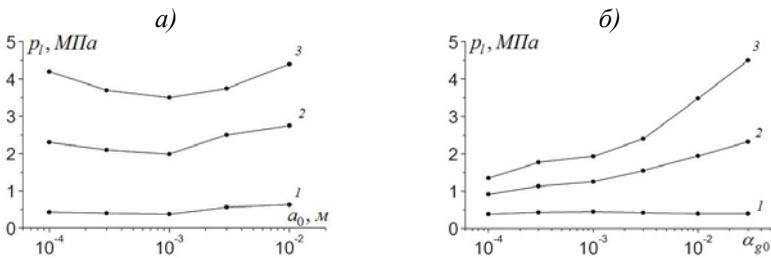


Рис. 3. Расчетная зависимость максимальных давлений, при отражении волны давления от дна канала, от начальных размеров пузырьков (а) и начального объемного газосодержания (б) пузырьковой системы.

Показано, что наибольшие всплески давления при отражении волны от дна канала возникают в жидкости с более крупными пузырьками, однако в сильно сужающихся каналах такие же высокие давления могут реализовываться и в мелкодисперсной пузырьковой жидкости. Выявлено, что с ростом объемного газосодержания пузырьковой жидкости в сужающихся каналах максимальные давления и температуры газа в пузырьках могут возрастать.

В третьей главе исследуются процессы инициирования детонационных волн в каналах переменного сечения с химически активной пузырьковой жидкостью волнами давления малой амплитуды.

В начале главы приводится обзор теоретических и экспериментальных работ по детонационным волнам в пузырьковой жидкости.

Представлена система основных уравнений, принятых для описания эволюции волн давления, с учетом процесса воспламенения горючего газа в пузырьках. Воспламенение газа учитывается следующим образом: при достижении температуры T_* , температура в пузырьках мгновенно изменяется на некоторую величину ΔT .

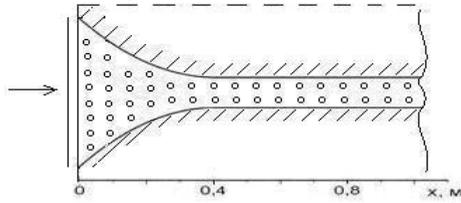


Рис. 4. Профиль канала.

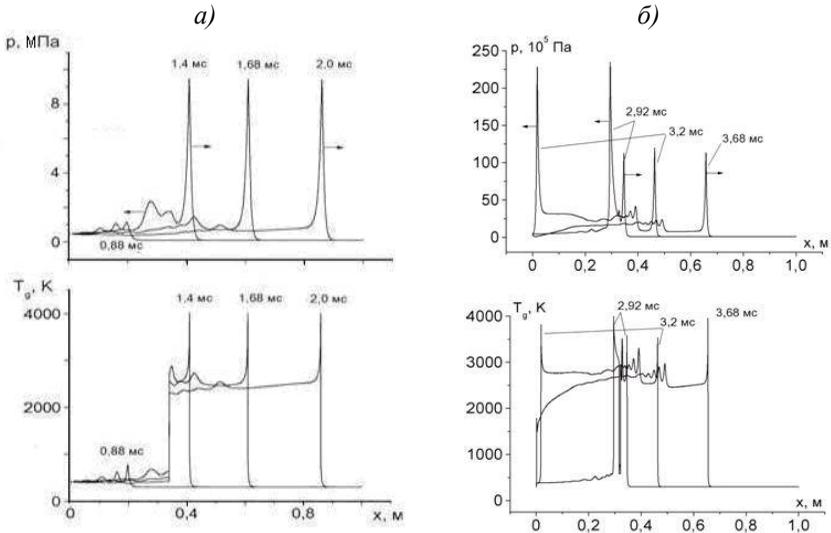


Рис. 5. Иницирование детонационной волны внутри канала. Параметры системы: жидкость – водоглицериновый раствор (с объемной концентрацией глицерина 0,5), газ – ацетилено-кислородная стехиометрическая смесь $C_2H_2 + 2,5O_2$, $p_{l0} = p_{g0} = 0,1$ МПа, $T_0 = 300$ К, $a_0 = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м; а) $\alpha_{g0} = 0,01$, $\Delta p = 3,6$ атм, б) $\alpha_{g0} = 0,05$, $\Delta p = 3,3$ атм.

Рассмотрены процессы возбуждения детонационных волн в цилиндрическом канале с начальным сужающимся участком, при воздействии импульсом давления ступенчатого вида, амплитуда которого недостаточна для иницирования детонации на входе канала.

Расчеты проводились для канала с диаметром входного сечения 0,5 м, диаметром цилиндрической части канала 0,1 м, длиной сужающегося участка 0,4 м (рис.5).

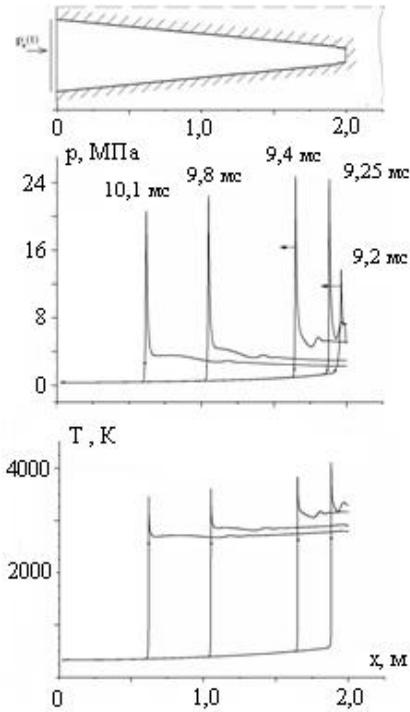


Рис. 6. Профиль канала и эпюры давления и температуры для распространения «отраженной» детонационной волны.

Изучена динамика «срыва» детонационной волны при ее распространении в расширяющихся каналах. В зависимости от начального газосодержания определен предельный угол расширения канала, при котором детонационная волна «срывается».

Представлены также результаты расчетов по инициированию детонационных волн в конусообразных сужающихся каналах с закрытым дном.

Показано, что кроме выявленных ранее двух типов развития детонации, в данных каналах можно произвести воспламенение газа в пузырьках при отражении инициирующей волны давления от дна канала. На рис. 6 показаны эпюры давления в жидкости и температуры газа, соответствующие распространению «отраженной» детонационной волны. Параметры канала: длина 2 м, диаметр входного сечения 0,5 м, диаметр дна 0,1 м (рис. 6а). Параметры пузырьковой системы: жидкость – водоглицериновый раствор (с объемной концентрацией глицерина 0,5), газ – ацетилено-кислородная стехиометрическая смесь $C_2H_2 + 2,5O_2$, $p_{l0} = p_{g0} = 0,1$ МПа, $T_0 = 300$ К, $a_0 =$

$1,5 \cdot 10^{-3}$ м, $\alpha_{g0} = 0,0075$. Амплитуда инициирующей волны на входе канала $\Delta p = 0,4$ МПа.

В заключении представлены основные результаты, полученные в работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В работе исследованы волновые течения газожидкостной пузырьковой смеси в каналах переменного сечения. Установлена возможность реализации высоких давлений и температур в газовой фазе изначально холодной пузырьковой жидкости при ее истечении через сопло, вследствие возникновения интенсивных колебаний пузырьков в расширяющейся части сопла вблизи минимального сечения. Рассмотрена динамика нелинейных волн в каналах переменного сечения и установлена возможность инициирования в них детонационных волн импульсами малой амплитуды. По результатам исследований могут быть сделаны следующие выводы:

1. Наиболее высокие температуры и давления газа, при истечении пузырьковой жидкости через сопло, реализуются в крупнодисперсных смесях, вследствие снижения тепловых потерь при пульсациях..
2. Установлено, что для водовоздушных смесей при температуре выше 25°C необходимо учитывать испарение жидкости. Поступление пара в пузырьки, при течении смеси в сопле приводит к усилению первого расширения пузырьков в области минимального сечения, а в последствии наличие этого пара в пузырьках оказывает демпфирующее воздействие в процессе сжатия. В результате этого наиболее высокие значения пиковых давлений и температур в парогазовых пузырьках реализуются не при первых схлопываниях, как это имеет место в пузырьковой жидкости при отсутствии фазовых переходов, а при последующих колебаниях.
3. Показана возможность инициирования слабым импульсом давления детонационной волны в цилиндрическом канале с помощью входного сужающегося участка.
4. В зависимости от объемного содержания пузырьков возможны два режима, дальнейшей эволюции детонационных волн, возникающих за счет усиления волн в сужающихся каналах. Если объемное содержание пузырьков выше некоторого критического значения, то детонационные волны распространяются в обоих направлениях от места взрыва. В том случае, когда объемное содержание ниже этого критического значения, то возможна одна детонационная волна, распространяющаяся в направлении сужения канала.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ильин Н.А., Шагапов В.Ш., Лепихин С.А. Численное моделирование инициирования и распространения детонационных волн в каналах переменного сечения, заполненных пузырьковой жидкостью // Наука в школе и вузе: Материалы научной конференции аспирантов и студентов. Под общ. Ред. Ш.Г. Зиятдинова. Бирск, 2007. С. 64-65
2. Лепихин С.А. Математическая модель стационарного течения монодисперсной пузырьковой жидкости в сопле // Наука в школе и вузе: Материалы научной конференции аспирантов и студентов. Под общ. ред. Ш.Г. Зиятдинова. Бирск, 2006. С. 78-81.
3. Лепихин С.А. О стационарном течении монодисперсной пузырьковой жидкости в сопле // Сб. тезисов докладов ВНКСФ-12, Новосибирск, 2006. С. 668-669.
4. Лепихин С.А. Динамика волн давления в сужающихся каналах, заполненных пузырьковой жидкостью // Научная сессия ТУСУР-2007: Материалы докладов Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 3 – 7 мая 2007 г. – Томск: Изд-во «В-Спектр», 2007. Ч.4. – С. 146-148.
5. Лепихин С.А. Моделирование стационарного течения монодисперсной пузырьковой жидкости в сопле // Сб. тезисов докладов Уфимской зимней школы-конференции по математике и физике, Уфа, 2005. С. 71-77.
6. Лепихин С.А. Инициирование детонации в сужающихся каналах, заполненных пузырьковой жидкостью, волнами давления умеренной амплитуды // Наука в школе и вузе: Материалы научной конференции аспирантов и студентов. Под общ. Ред. Ш.Г. Зиятдинова. Бирск, 2007. С. 89-91.
7. Лепихин С.А. Моделирование стационарного течения полидисперсной пузырьковой жидкости в сопле // ЭВТ в обучении и моделировании. Сб. науч. трудов. IV Регион. науч.-практ. конф., Бирск, 2005. С. 255-259.
8. Лепихин С.А., Кудрейко А.А. Стационарное течение пузырьковой жидкости в сопле // Вестник БирГПИ. Под ред. С.М. Усманова. Вып. 5. Бирск, 2005. С. 45-49.
9. Лепихин С.А., Галимзянов М.Н. Распространение волновых возмущений в каналах переменного сечения заполненных пузырьковой жидкостью // Сб. тезисов докладов ВНКСФ-13, Ростов-на-Дону–Таганрог, 2007. С. 595–596.
10. Лепихин С.А., Галимзянов М.Н. Численное исследование реализации высоких давлений и температур в газовой фазе пузырьковой жидкости при ее истечении через сопла // Сб. трудов XV Зимней школы по механике сплошных сред, Пермь, 2007. С. 225–229.

11. Лепихин С.А., Шагапов В.Ш. Динамика инициирования и распространения детонационных волн в каналах переменного сечения, заполненных пузырьковой жидкостью // ЭВТ в обучении и моделировании: Сб. науч. трудов. Отв. Ред. С.М. Усманов. VI Всероссийская научно-методич. конф. 20 – 21 апреля 2007 г. – Бирск, БирГСПА, 2007. С. 101–105.
12. Шагапов В.Ш., Лепихин С.А., Галимзянов М.Н. О возможности получения высоких давлений и температур в газовой фазе пузырьковой жидкости при ее стационарном истечении через сопло. // VI Международная конференция по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ-2006). Сб. тез. – 26 июня – 1 июля 2006, Санкт-Петербург, 2006. С. 340-341.
13. Шагапов В.Ш., Лепихин С.А., Галимзянов М.Н. Реализация высоких давлений и температур в газовой фазе при истечении пузырьковой жидкости через сопло // Инженерно-физический журнал, 2007, Т. 80, № 6, С. 134-137.

Лепихин Сергей Анатольевич

**ВОЛНОВЫЕ ТЕЧЕНИЯ ПУЗЫРЬКОВОЙ ЖИДКОСТИ В
КАНАЛАХ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ**

Автореферат на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Лицензия на полиграфическую деятельность 002037 от 08 ноября 2001 года,
выданная Поволжским межрегиональным территориальным управлением
Министерства Российской Федерации по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций

Подписано в печать __.__.2007 г.

Гарнитура «Times». Печать на ризографе с оригинала.

Формат 60x84/16. Усл.-печ.л. 1,45. Уч.-изд.л. 1,16.

Бумага писчая. Тираж 100 экз. Заказ № ____.

Цена договорная.

452453, Республика Башкортостан, г. Бирск, ул. Интернациональная, д. 10.

ГОУ ВПО «Бирская государственная социально-педагогическая академия»

Отдел множительной техники БирГСПА