

На правах рукописи

ТЕРЕГУЛОВА Евгения Александровна

УДК 532.529:534.2

АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ В ДВУХФРАКЦИОННЫХ
ГАЗОВЗВЕСЯХ С ФАЗОВЫМИ ПРЕВРАЩЕНИЯМИ
В ОДНОЙ ИЗ ФРАКЦИЙ

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

КАЗАНЬ - 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте механики и машиностроения Казанского научного центра РАН.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН
Губайдуллин Дамир Анварович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор **Шагапов Владислав**
Шайхулагзамович

доктор физико-математических наук,
профессор **Саламатин Андрей**
Николаевич

Ведущая организация: Казанский национальный
исследовательский технический
университет имени А.Н. Туполева - КАИ

Защита состоится «24» ноября 2011 г. в 14 час. 30 мин. в аудитории мех.2 на заседании диссертационного Совета Д 212.081.11 при Казанском федеральном (Приволжском) университете по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Казанского федерального (Приволжского) университета.

Автореферат разослан “21” октября 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук,
доцент



Саченков А.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Многофазные среды широко распространены в природе и современной технике. Из многообразия неоднородных сред могут быть выделены дисперсные смеси (аэрозоли, туманы, пузырьковые жидкости, взвеси и т.д.), имеющие сравнительно регулярный характер и представляющие собой смесь двух фаз, одной из которых являются различные включения (твердые частицы, капли, пузырьки).

В настоящее время значительный интерес представляют исследования волновой динамики и акустики дисперсных сред применительно к проблемам развития акустических методов диагностики таких систем, а также методов подавления звуковых возмущений дисперсными смесями. Так, перспективной является возможность применения дисперсных систем для уменьшения шума в различных устройствах, например, в авиационных двигателях. Развитие таких методов способствует как решению задач безопасности процессов на промышленных объектах в машиностроении, энергетике и т.д., так и проблем экологии атмосферы, значительно загрязненной различными аэрозолями промышленного характера. Результаты исследований могут быть использованы при исследовании вышеназванных задач, а также при решении фундаментальных проблем механики многофазных сред.

Целью настоящей диссертации является теоретическое исследование распространения акустических возмущений различной геометрии в двухфракционных газовзвесьях с включениями разных теплофизических свойств и размеров с учетом нестационарных и неравновесных эффектов межфазного взаимодействия.

Научная новизна. В диссертации впервые изучена динамика волн малой амплитуды разной геометрии в двухфракционных газовзвесьях без учета и с учетом фазовых превращений. Выведены общие дисперсионные соотношения, определяющие распространение плоских, сферических и цилиндрических возмущений в двухфракционных газовзвесьях. Получены асимптотики относительной скорости звука и коэффициента затухания.

Для случая длинноволновых возмущений разной геометрии система уравнений движения сведена к одному уравнению для возмущений давления. Выполнен анализ влияния геометрии процесса, фазовых переходов и основных параметров дисперсных смесей на эволюцию импульсных возмущений.

Обоснованность и достоверность. Полученные результаты основаны на фундаментальных законах и уравнениях механики сплошных гетерогенных сред, а также физически естественных допущениях. Результаты в частных случаях хорошо согласуются с теоретическими результатами других авторов и с известными экспериментальными данными.

Теоретическая и практическая значимость. Полученные результаты расширяют и углубляют теоретические знания о волновых процессах в двухфракционных газовзвесах и имеют широкий спектр приложения на практике. Результаты и выводы исследований акустических свойств двухфракционных газовзвесей могут быть использованы при развитии методов акустической диагностики двухфазных смесей и контроля протекающих в них процессов.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с бюджетной темой «Динамика неоднородных и многофазных сред» №01200955817 (2009-2011 гг.), при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 04-01-00107, № 07-01-00339, № 10-01-00098), в рамках программы Президиума РАН № 17П, № 20П, фонда НИОКР республики Татарстан (проект № 05-5.4-127), при содействии Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых и ведущих научных школ РФ (грант МК-1316.2010.1 и гранты НШ-3483.2008.1, НШ-4381.2010.1), при поддержке Министерства образования и науки РФ (государственный контракт №14.740.11.0351).

Положения, выносимые на защиту.

- Математическая модель, описывающая движение двухфракционных газовзвесей с учетом нестационарных и неравновесных эффектов межфазного взаимодействия.
- Общие дисперсионные соотношения, определяющие распространение плоских, сферических и цилиндрических акустических возмущений в двухфракционных газовзвесах.
- Низкочастотные и высокочастотные асимптотики для коэффициента затухания и фазовой скорости в двухфракционных газовзвесах.
- Результаты анализа дисперсионных кривых, асимптотик коэффициента затухания и фазовой скорости звука, установленные закономерности эволюции импульсных возмущений давления различной начальной формы в двухфракционных газовзвесах.

Апробация работы. Основные результаты, полученные в диссертации, докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях и школах: на итоговых конференциях ИММ КазНЦ РАН (г. Казань, 2007-2010); на VI Всероссийской школе–семинаре молодых ученых и специалистов ак. РАН В.Е. Алемасова "Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении" (г. Казань, 2008); на V Всероссийской научно-технической конференции "Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики АНТЭ-2009"(г. Казань, 2009); на VII Всероссийской школе–семинаре молодых ученых и специалистов ак. РАН В.Е. Алемасова "Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении" (г. Казань, 2010); на Всероссийской научной школе молодых ученых "Механика неоднородных жидкостей в полях внешних сил" (г. Москва, 2010); International Aerosol Conference (Finland, Helsinki, 2010); на Международной научной школе молодых ученых и специалистов "Механика неоднородных жидкостей в полях внешних сил: вихри и волны" (г. Москва, 2011); на X Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (г. Нижний Новгород, 2011).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 13 работах, 5 из которых - в изданиях из перечня ВАК, список которых приведен в конце автореферата.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 111 страниц, в том числе 30 рисунков. Список литературы состоит из 63 наименований. В заключении сформулированы основные результаты работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируется цель работы, излагается ее краткое содержание, и приводятся положения, выносимые на защиту.

В первой главе дан краткий обзор опубликованных теоретических и экспериментальных работ по теме диссертации. Обсуждены основные особенности распространения слабых монохроматических и импульсных возмущений в моно- и полидисперсных газовзвесах. Рассмотрены результаты работ, посвященных исследованию распространения возмущений в газовзвесах.

Вторая глава посвящена изучению распространения акустических возмущений в двухфракционных смесях инертного газа с твердыми частицами двух разных размеров и теплофизических свойств, когда объемное содержание дисперсной фазы мало.

Записывается линеаризованная система дифференциальных уравнений возмущенного движения двухфракционной газовой смеси с частицами разных теплофизических свойств и размеров. Задаются зависимости силового и теплового взаимодействия фаз от частоты колебаний. Вводятся потенциалы скоростей фаз, и система уравнений записывается в новых переменных. Далее рассматривая решения полученной системы уравнений в виде прогрессивных гармонических волн, получено дисперсионное соотношение для комплексного волнового числа

$K_{\dot{i}} = K + iK_{\dot{i}*\dot{i}}$, описывающее распространение плоских, сферических и цилиндрических волн в двухфракционных газозвесах с твердыми частицами разных теплофизических свойств и размеров. Зависимость $K_{\dot{i}}(\omega)$ определяет коэффициент затухания $K_{\dot{i}*\dot{i}}$ и фазовую скорость звука $C_p = \omega/K$ в виде функции от частоты и теплофизических свойств взвеси. Для случая длинноволновых возмущений система уравнений движения сведена к одному уравнению относительно возмущений давления.

Построены дисперсионные кривые для смеси воздуха с частицами льда и алюминия. Установлено, что двухфракционность состава приводит к возникновению характерного перегиба для зависимости относительной скорости звука в области частот обратно пропорциональных характерным

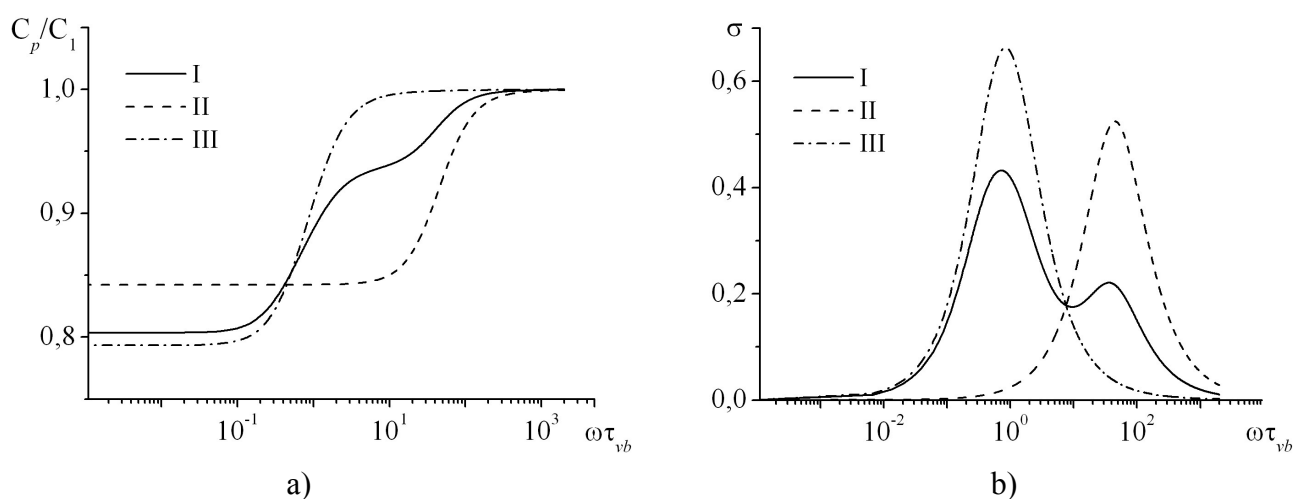


Рис. 1 – Зависимости относительной скорости звука и декремента затухания на длине волны от безразмерной частоты колебаний $\omega \tau_{vb}$ для смеси воздуха с частицами льда и алюминия (I), монодисперсных газозвесей с частицами алюминия (II) и льда (III).

временам релаксации скоростей включений каждой фракции дисперсной фазы (рис. 1a). Различие размеров и теплофизических параметров фракций дисперсной фазы приводит к возникновению двух максимумов для зависимости декремента затухания на длине волны от безразмерной частоты, реализующихся при частотах, обратно пропорциональных характерным временам релаксации скоростей фаз (рис. 1b).

С использованием подпрограмм быстрого преобразования Фурье проведены расчеты распространения импульсов разной геометрии в смеси

воздуха с частицами льда и алюминия.

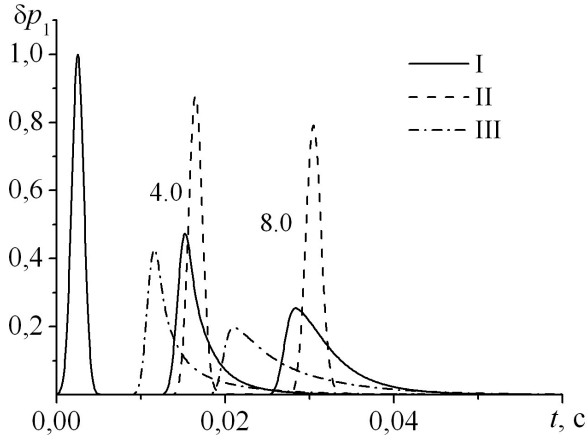


Рис. 2 — Эволюция импульсного возмущения гауссовой формы в двухфракционной газовой смеси с частицами льда и алюминия (I), монодисперсных газовой смеси с частицами алюминия (II) и льда (III) в плоском случае

Двухфракционность состава в рассматриваемых газовых смесях (кривая I) приводит к изменению величины затухания и формы импульсов давления, в силу различия дисперсии скорости звука и диссипации волн по сравнению с монодисперсными газовыми смесями (кривые II, III), при одинаковом массовом содержании дисперсной фазы. Установлено, что наличие твердых частиц другого радиуса и теплофизических свойств

существенно влияет на динамику слабых возмущений в двухфракционных газовых смесях.

В третьей главе изучается распространение акустических возмущений в двухфракционных парогазокапельных смесях с твердыми частицами с учетом нестационарных и неравновесных эффектов межфазного теплообмена.

Линеаризованная система уравнений возмущенного движения парогазокапельной смеси с твердыми частицами имеет вид

$$\frac{\partial \rho \check{y}}{\partial t} + \rho_{10} \frac{\partial \check{v}}{\partial r} + \theta \frac{\check{v}}{r} = -n_{0l} j_{V\Sigma}, \quad \frac{\partial \rho \check{y}}{\partial t} + \rho_{v0} \frac{\partial \check{v}}{\partial r} + \theta \frac{\check{v}}{r} = -n_{0l} j_{V\Sigma},$$

$$\frac{\partial \rho \check{y}_l}{\partial t} + \rho_{20l} \frac{\partial \check{v}_l}{\partial r} + \theta \frac{\check{v}_l}{r} = n_{0l} j_{\Sigma}, \quad \frac{\partial \rho \check{y}_a}{\partial t} + \rho_{20a} \frac{\partial \check{v}_a}{\partial r} + \theta \frac{\check{v}_a}{r} = 0,$$

$$\rho_{10} \frac{\partial \check{v}}{\partial t} + \frac{\partial p \check{y}}{\partial r} + \sum_{j=a,l} n_{0j} f_j = 0, \quad \rho_{20j} \frac{\partial \check{v}_j}{\partial t} = n_{0j} f_j, \quad (j = a, l)$$

$$\rho_{v0} \frac{\partial \check{y}}{\partial t} + \rho_{G0} \frac{\partial \check{y}_G}{\partial t} = \alpha_{10} \frac{\partial p \check{y}}{\partial t} - \sum_{j=a,l} n_{0j} q_{1\Sigma j}, \quad \rho_{20j} \frac{\partial \check{u}_j}{\partial t} = -n_{0j} q_{2\Sigma j}, \quad (j = a, l)$$

$$q_{1\Sigma a} + q_{2\Sigma a} = 0, \quad q_{1\Sigma l} + q_{2\Sigma l} = -j_{\Sigma} l_0.$$

$$p\check{y} = \frac{C_V^2}{\gamma_V \alpha_{10}} \rho\check{y} + p_{V0} \frac{T\check{y}}{T_0}, \quad p\check{y} = \frac{C_1^2}{\gamma_1 \alpha_{10}} (\rho\check{y} + \Delta \bar{R} (\rho\check{y} - k_V \rho\check{y})) + p_{10} \frac{T\check{y}}{T_0},$$

$$i\check{y} = c_{pV} T_1 \check{y} \quad i\check{y}_G = c_{pG} T_1 \check{y} \quad (c_{pV}, c_{pG} = \text{const})$$

$$\rho_{2j}^\circ \check{y} = 0, \quad u\check{y}_j = c_{2j} T_2 \check{y}_j. \quad (c_{2j} = \text{const}), (j = a, l)$$

$$\rho_{10} = \alpha_{10} \rho_{10}^\circ, \quad \rho_{20j} = \alpha_{20j} \rho_{20j}^\circ, \quad \alpha_{20j} = \frac{4}{3} \pi \delta_j^3 n_{0j}, \quad (j = a, l)$$

$$\alpha_{10} + \alpha_{20a} + \alpha_{20l} = 1, \quad \Delta \bar{R} = (R_V - R_G) / R_{10}.$$

Система уравнений при значении параметра $\theta = 0$ описывает плоские волны в декартовых координатах, при $\theta = 1$ – цилиндрические волны в цилиндрических координатах, при $\theta = 2$ – сферические волны в сферических координатах. Переменные с индексом 1 относятся к несущей фазе, с индексом 2 – к дисперсной фазе, индекс 0 соответствует начальному невозмущенному состоянию; штрихи вверху используются для обозначения возмущенных параметров; переменные с индексом a относятся к частицам радиуса δ_a , с индексом l – к каплям радиуса δ_l ; V и G отмечают параметры паровой и газовой компонент несущей фазы; ρ , ρ° , v , p , T – соответственно приведенная и истинная плотности, скорость, давление, температура; i_1 – энтальпия несущей фазы; u_{2j} – внутренняя энергия j -ой фракции ($j = a, l$); c_{p1} – теплоемкость несущей фазы при постоянном давлении, c_{2j} – теплоемкость j -х включений ($j = a, l$), α_j – объемное содержание j -ой фазы ($j = 1, 2a, 2l$), n_{0j} – число j -х частиц в единице объема смеси ($j = a, l$); μ_1 – коэффициент динамической вязкости несущей среды; $q_{1\Sigma_j}$ – интенсивность теплообмена несущей фазы с поверхностью j -ой частицей, $q_{2\Sigma_j}$ – интенсивность теплообмена внутренней части j -ой частицы с поверхностью раздела фаз; λ_j – теплопроводность j -ой фазы ($j = 1, 2a, 2b$); Nu_{1j} и β_{1j}^T – безразмерный (число Нуссельта) и размерный коэффициенты теплообмена несущей

фазы с границей раздела j -го типа частиц ($j = a, b$), Nu_{2j} и β_{2j}^T – безразмерный (число Нуссельта) и размерный коэффициенты теплообмена j -го типа частиц ($j = a, b$); $j_{V\Sigma}$ – диффузионный поток пара к поверхности капли Σ , j_Σ – интенсивность конденсации на поверхности индивидуальной капли; l_0 – удельная теплота парообразования; k_V – концентрация пара в несущей фазе; R – газовая постоянная, D_1 – коэффициент бинарной диффузии, C_1 и C_V – соответственно скорости звука в несущей среде и паровой составляющей несущей среды.

Тепловые потоки извне $q_{1\Sigma j}$ и изнутри $q_{2\Sigma j}$ j -го включения к его поверхности и межфазный диффузионный поток пара к поверхности отдельной капли $j_{V\Sigma}$ задаются соотношениями

$$\begin{aligned} q_{1\Sigma j} &= 2\pi \delta_j \lambda_{1j} Nu_{1j} (T_{1j}^{\check{}} - T_{\Sigma j}^{\check{}}), \quad Nu_{1j} = 2\delta_j \beta_{1j}^T / \lambda_{1j}, \quad (j = a, l) \\ q_{2\Sigma j} &= 2\pi \delta_j \lambda_{2j} Nu_{2j} (T_{2j}^{\check{}} - T_{\Sigma j}^{\check{}}), \quad Nu_{2j} = 2\delta_j \beta_{2j}^T / \lambda_{2j}, \quad (j = a, l) \\ (1 - k_V) j_{V\Sigma} &= 2\pi \delta_l \rho_1^{\circ} D_1 Sh_1 (k_V - k_{V\Sigma}), \quad Sh_1 = 2\delta_l \beta_1^D / D_1. \end{aligned}$$

При изучении акустических возмущений в газозвеси с фазовыми переходами необходим учет зависимости тепловых потоков извне $q_{1\Sigma j}$ и изнутри $q_{2\Sigma j}$ включений к их поверхности и интенсивности массообмена $j_{V\Sigma}$ от частоты колебаний ω . В рамках трехтемпературной модели межфазного теплообмена и принятой схемы фазового превращения этот учет сводится к учету зависимостей от частоты колебаний чисел Нуссельта и Шервуда.

Фазовые превращения на границе раздела фаз протекают неравновесно, поэтому давление пара на границе $p_{V\Sigma}$ отличается от давления насыщения $p_{VS}(T_\Sigma)$. Интенсивность неравновесной конденсации на поверхности раздела фаз задается с помощью формулы Герца-Кнудсена-Ленгмюра

$$\frac{n_l j_\Sigma}{\alpha_{2l} \rho_1^{\circ}} = \frac{1}{\tau_\beta} \frac{p_{V\Sigma}^{\check{}} - p_{VS}^{\check{}}}{p_1}, \quad \tau_\beta = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{2\pi}{\gamma_V}} \frac{\gamma_1 C_V \delta_l}{\beta C_1^2}.$$

Здесь τ_β – характерное время выравнивания парциальных давлений пара на межфазной границе, зависящее от значения коэффициента аккомодации β , γ – показатель адиабаты. Из условия баланса массы на поверхности капли получаем

$$J_{V\Sigma} = J_\Sigma.$$

Вводя потенциалы скоростей фаз и рассматривая решения полученной системы уравнений в виде прогрессивных волн, получаем дисперсионное соотношение для комплексного волнового числа K_i , описывающее распространение плоских, сферических и цилиндрических акустических возмущений и справедливое в широком диапазоне частот. Найдены низкочастотная и высокочастотная асимптотики коэффициента затухания, равновесная и замороженная скорости звука. Для случая длинноволновых возмущений система уравнений движения сведена к одному уравнению относительно возмущений давления.

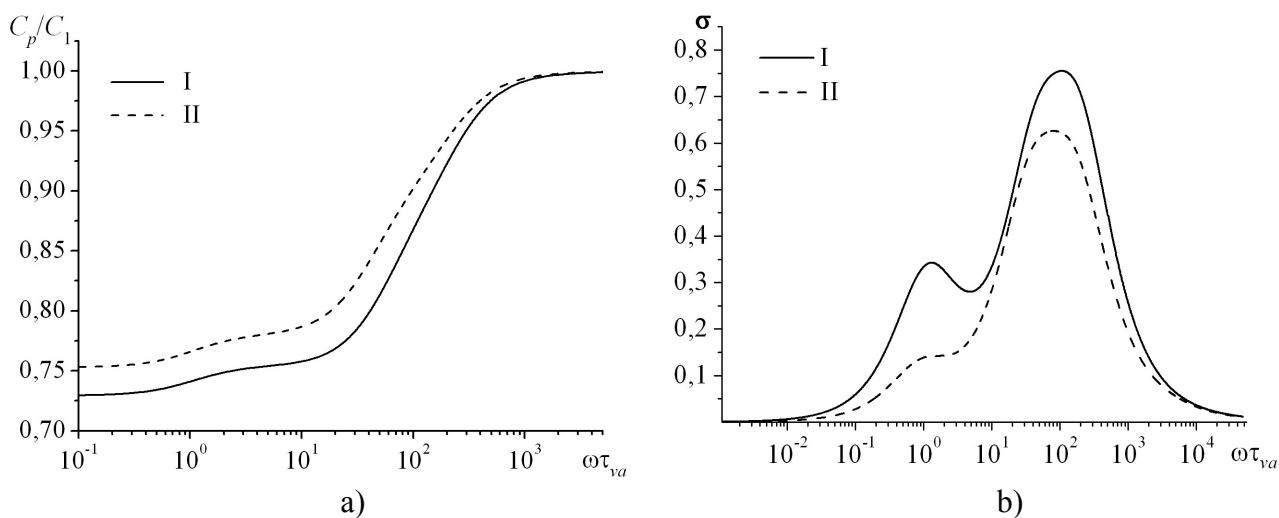


Рис. 3 –Зависимость относительной скорости звука и декремента затухания на длине волны от безразмерной частоты колебаний $\omega \tau_{va}$ для смеси воздуха с паром, каплями воды и частицами песка с учетом (I) и без учета (II) межфазного массообмена

Как и в первой задаче двухфракционность состава и различие теплофизических параметров фракций приводит к возникновению характерного перегиба для зависимости относительной скорости звука в области частот обратно пропорциональных характерным временам релаксации скоростей фаз τ_{va} и τ_{vl} (рис. 3а) и к возникновению двух

максимумов для зависимости декремента затухания на длине волны на характерных значениях безразмерных частот $\omega \tau_{va}, \omega \tau_{vl} = 1$ (рис. 3b).

Установлено, что при увеличении массового содержания дисперсной фазы фазовая скорость звука на низких частотах уменьшается, а на высоких практически не изменяется и стремится к своему асимптотическому значению – скорости звука в чистом газе. Также показано, что с увеличением массового содержания декремент затухания на длине увеличивается практически на всем диапазоне частот. Учет межфазного массообмена приводит к уменьшению относительной скорости звука и увеличению декремента затухания на длине волны (рис. 3).

С использованием подпрограмм быстрого преобразования Фурье численно исследованы особенности распространения плоских, сферических и цилиндрических импульсных возмущений давления малой амплитуды в двухфракционных парогазокапельных смесях с твердыми частицами.

Показано, что наличие межфазного массообмена приводит как к более сильному затуханию, так и к более значительному изменению формы импульсов давления, в силу большей дисперсии скорости звука и

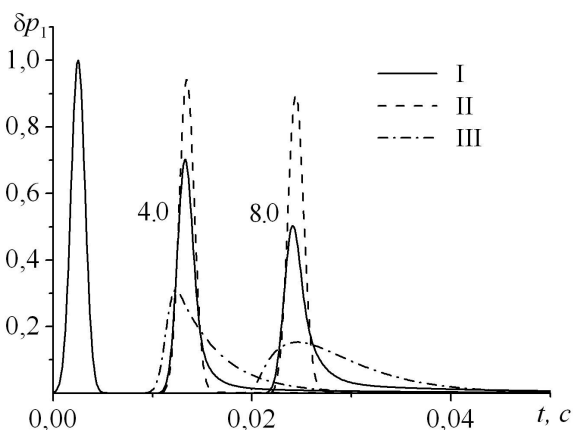


Рис. 4 – Эволюция импульсного возмущения гауссовой формы в смеси воздуха с паром, каплями воды и частицами песка (I), монодисперсной газозвеси с частицами песка (II) и смеси воздуха с паром и каплями воды (III).

диссипации волн. В смеси газа с паром, каплями и твердыми частицами затухание импульса будет больше, чем для монодисперсной газозвеси с твердыми частицами и меньше, чем для смеси газа с паром и каплями, при неизменном общем массовом содержании дисперсной фазы (рис. 4). Установлено, что наличие загрязняющих примесей (твердых частиц) существенно влияет на динамику слабых волн в парогазокапельных смесях, что необходимо

учитывать при развитии методов акустической диагностики двухфазных сред.

Основные результаты и выводы:

Развита теория распространения акустических волн разной геометрии в двухфракционных парогазокапельных смесях с твердыми частицами разных материалов и размеров без учета и с учетом фазовых превращений. Представлены математические модели, записаны замкнутые линеаризованные системы дифференциальных уравнений возмущенного движения. Выведены дисперсионные соотношения, определяющие распространение плоских, сферических и цилиндрических возмущений в двухфракционных газовзвесьях. Для длинноволновых возмущений разной геометрии система уравнений движений сведена к одному уравнению относительно возмущений давления.

Найдены равновесная и замороженная скорости звука, низкочастотная и высокочастотная асимптотики коэффициента затухания. Установлено, что на диссипацию низкочастотных возмущений существенное влияние оказывают эффекты межфазного теплообмена. Высокочастотная асимптотика коэффициента затухания в основном определяется главным членом, который прямо пропорционален массовому содержанию капель и частиц. При распространении высокочастотных возмущений определяющими диссипативными эффектами являются эффекты межфазного трения, а влияние межфазного массообмена на диссипацию возмущений проявляется слабо.

Для двухфракционной парогазокапельной смеси и твердых частиц проанализировано влияние параметров дисперсной фазы на дисперсию и диссипацию гармонических возмущений и эволюцию слабых импульсов давления. Установлено, что различие размеров и теплофизических параметров фракций дисперсной фазы приводит к возникновению двух максимумов для зависимости декремента затухания на длине волны от безразмерной частоты, реализующихся при частотах, обратно пропорциональных характерным временам релаксации скоростей фаз.

Также двухфракционность состава приводит к возникновению характерного перегиба для зависимости относительной скорости звука в области частот обратно пропорциональных характерным временам релаксации скоростей включений каждой фракции дисперсной фазы.

Межфазный массообмен в рассматриваемых газовзвесах приводит как к более сильному затуханию, так и к более значительному изменению формы импульсов давления, в силу большей дисперсии скорости звука и диссипации волн. В смеси газа с паром, каплями и твердыми частицами затухание импульса будет больше, чем для монодисперсной газовзвеси с твердыми частицами и меньше, чем для смеси газа с паром и каплями, при неизменном общем массовом содержании дисперсной фазы. Установлено, что наличие загрязняющих примесей (твердых частиц) существенно влияет на динамику слабых волн в парогасокапельных смесях, что необходимо учитывать при развитии методов акустической диагностики двухфазных сред.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

- 1. Уткина Е.А.** Распространение акустических волн в двухфракционных газовзвесах с частицами разных материалов и размеров [Текст] / Д.А. Губайдуллин, А.А. Никифоров, Е.А. Уткина // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. – 2009. – Т. 1-2. – С. 25-33.
- 2. Уткина Е.А.** Акустические волны в двухфракционных смесях газа с каплями и частицами разных материалов и размеров при наличии фазовых превращений. [Текст] / Д.А. Губайдуллин, А.А. Никифоров, Е.А. Уткина // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. – 2010. – Т.7-8. – С.3-13.
- 3. Уткина Е.А.** Акустические волны в двухфракционных смесях газа с паром, каплями и твердыми частицами разных материалов и размеров при наличии фазовых превращений [Текст] / Д.А.

Губайдуллин, А.А. Никифоров, Е.А. Уткина // **Изв. РАН. Механика жидкости и газа.** – 2011. – № 1. – С. 95-103.

4. **Уткина Е.А.** Влияние фазовых превращений на распространение акустических волн в двухфракционных смесях газа с паром, каплями и твердыми частицами разных материалов и размеров [Текст] / Д.А. Губайдуллин, А.А. Никифоров, Е.А. Уткина // Теплофизика высоких температур. – 2011. – №.6. – С. 942-947.
5. **Уткина Е.А.** Акустические возмущения в парогазожидкостных системах [Текст] / А.А. Никифоров, Е.А. Уткина, Р.Н. Гафиятов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. МЖГ. – 2011. – №4(3). – С.1017-1018.

Статьи в сборниках научных трудов и тезисы докладов на научных конференциях:

6. **Уткина Е.А.** Распространение акустических волн в двухфракционных газовзвесьях с частицами разных материалов и размеров [Текст] / Д.А. Губайдуллин, Е.А. Уткина // Материалы докладов VI Школы–семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова “Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении”. – Казань, 2008. – С.160-162.
7. **Уткина Е.А.** Динамика слабых волн в двухфазных средах [Текст]/ Д.А. Губайдуллин, А.А. Никифоров, Е.А. Уткина, Р.Н. Гафиятов // Материалы V Всероссийской научно-технической конференции "Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики"– Казань, 2009. – С.546-551.
8. **Уткина Е.А.** Акустические волны в двухфракционных смесях газа с паром, каплями и твердыми частицами разных материалов и размеров при наличии фазовых превращений [Текст] / Е.А. Уткина // Материалы докладов VII Школы–семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова “Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении”. – Казань, 2010. – С.230 - 233.

9. **Уткина Е.А.** Акустические возмущения в двухфракционных парогазожидкостных системах [Текст] / А.А. Никифоров, Е.А. Уткина, Р.Н. Гафиятов // Сборник тезисов докладов Всероссийской научной школы молодых ученых "Механика неоднородных жидкостей в полях внешних сил". – Москва, 2010. – С.66-67.
10. **Utkina E.A.** Acoustic waves in aerosols [Текст] / E.A. Utkina, A.A. Nikiforov // Сборник тезисов докладов Международной научной школы молодых ученых и специалистов "Механика неоднородных жидкостей в полях внешних сил: вихри и волны". – Москва, 2011. – С.35-36.
11. **Терегулова Е.А.** Линейные волны разной геометрии в двухфракционных газозвесах с фазовыми превращениями [Текст] / Д.А. Губайдуллин, А.А. Никифоров, Е.А. Терегулова // В сб. "Актуальные проблемы механики сплошной среды. К 20-летию ИММ КазНЦ РАН" Т.II. – Казань: Фолиант, 2011. – 240с. – С.37-52.
12. **Уткина Е.А.** Акустические возмущения в парогазожидкостных системах [Текст] / А.А. Никифоров, Е.А. Уткина, Р.Н. Гафиятов // Тезисы докладов Второй Всероссийской школы молодых ученых-механиков «Современные методы механики». X Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета им. Н.И.Лобачевского, 2011. С.120.

Публикации в трудах международных конференций:

13. **Utkina Eugenia** Acoustic waves in aerosols [Электронный ресурс] / **Gubaidullin Damir, Nikiforov Anatoly and Utkina Eugenia** // Abstract of International Aerosol Conference, Finland, Helsinki, 2010. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. – URL: <http://www.atm.helsinki.fi/IAC2010/abstracts/pdf/695.pdf> (дата обращения: 29.09.2011).