

На правах рукописи

НИКИФОРОВ Анатолий Анатольевич

УДК 532.529:534.2

**СФЕРИЧЕСКИЕ И ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ МАЛОЙ
АМПЛИТУДЫ В ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМАХ**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

КАЗАНЬ - 2007

Работа выполнена в Институте механики и машиностроения Казанского научного центра РАН.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН
Д.А. Губайдуллин

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор А.Н. Саламатин

доктор физико-математических наук,
профессор А.Г. Кутушев

Ведущая организация: Институт механики Уфимского научного
центра РАН, г.Уфа

Защита состоится 31 мая 2007 г. в 14 час. 30 мин. в аудитории физ.2 на заседании диссертационного Совета Д 212.081.11 при Казанском государственном университете по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Казанского государственного университета.

Автореферат разослан “___” апреля 2007 г.

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

Саченков А.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Неоднородные или многофазные среды широко представлены 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 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 решении вышеназванных задач, а также при решении фундаментальных проблем механики многофазных сред.

Цель работы. Теоретическое исследование распространения акустических возмущений различной геометрии в парогазокапельных средах и смесях жидкости с парогазовыми пузырьками с учетом нестационарных и неравновесных эффектов межфазного взаимодействия.

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.

Апробация работы. Основные результаты, полученные в диссертации, докладывались и обсуждались на Всероссийской школе–семинаре молодых ученых и специалистов под рук. ак. РАН В.Е. Алемасова “Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении” (г.Казань, 1999, 2000, 2002, 2006), на III и IV Международной научной школе-семинаре “Импульсные процессы в механике сплошных сред” (г.Николаев, Украина, 1999, 2001), на II Международном симпозиуме “Актуальные проблемы механики сплошных и сыпучих сред” (г.Москва, 1999), на конкурсе научно-практических работ студентов и аспирантов на именную стипендию Главы администрации г. Казани (г.Казань, 2001), на Международной конференции «XVII сессия Международной Школы по моделям механики сплошной среды» (г.Казань, 2004), на Итоговых конференциях КазНЦ РАН (г.Казань, 2001-2007), на семинарах ИММ КазНЦ РАН под руководством чл.-корр. РАН Д.А. Губайдуллина (г.Казань, 2001-2007).

Научная новизна. Впервые изучена динамика сферических и цилиндрических волн малой амплитуды в парогазокапельных средах и в смесях жидкостях с парогазовыми пузырьками с учетом фазовых превращений. Из условия существования решений у представленных систем уравнений в виде возмущений для потенциалов скоростей фаз выведены общие дисперсионные соотношения, определяющие распространение сферических и цилиндрических возмущений в моно- и полидисперсных газозвесах и в смесях жидкости с пузырьками пара и газа. Выполнен анализ влияния геометрии процесса, фазовых переходов, основных параметров дисперсных смесей на эволюцию импульсных возмущений.

Теоретическая и практическая значимость. Полученные результаты расширяют и углубляют теоретические знания о волновых процессах в дисперсных системах и имеют широкий спектр приложения на практике. Результаты и выводы исследований акустических свойств полидисперсных парогазокапельных смесей и смесей жидкости с парогазовыми пузырьками могут быть использованы при развитии

методов акустической диагностики двухфазных смесей и контроля протекающих в них процессов.

Работа выполнена в соответствии с научным планом Института механики и машиностроения КазНЦ РАН, при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 01-01-0372, № 04-01-00107, № 07-01-00339), в рамках программы ОЭММПУ РАН № 14, Федеральной целевой программы «Интеграция» (код проекта А0012) и фонда НИОКР республики Татарстан (проект № 05-5.4-127). Результаты исследований акустических возмущений в полидисперсных парогазокапельных средах включены в важнейшие достижения РАН (Российская академия наук. 1991-2001. М.:Наука, ЦИСН, 2002).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 16 работах, список которых приведен в конце автореферата.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 117 страниц, в том числе 24 рисунка. Список литературы состоит из 67 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 газовзвесьях в плоском случае. Рассмотрены результаты работ, посвященных исследованию распространения возмущений в пузырьковых жидкостях.

Вторая глава посвящена проблеме распространения сферических и цилиндрических возмущений малой амплитуды в монодисперсных смесях

газа и включений. Рассматривается монодисперсная смесь инертного газа с твердыми частицами и смесь газа с паром и каплями, когда объемное содержание дисперсной фазы мало ($\alpha_2 \ll 10^{-2}$). Предполагается, что теплофизические параметры газообразной фазы определяются по параметрам газа и пара. При задании силового, теплового и массового взаимодействия фаз учитывается зависимость силы f , тепловых потоков $q_{i\Sigma}$ ($i = 1, 2$) и интенсивности массообмена j от частоты колебаний ω . Интенсивность неравновесной конденсации на поверхности раздела фаз j_Σ задается с помощью формулы Герца-Кнудсена-Ленгмюра.

Рассматриваются решения записанной системы уравнений относительно возмущений потенциалов скоростей фаз.

Получена дисперсионная зависимость комплексного волнового числа $K_* = K + iK_{**}$ от частоты колебаний, описывающая распространение как плоских, так сферических и цилиндрических волн в монодисперсных парогасокапельных системах при наличии фазовых переходов. Зависимость $K_*(\omega)$ определяет коэффициент затухания K_{**} и фазовую $C_p = \omega / K$ скорость звука в виде функции от частоты и теплофизических свойств взвеси.

Третья глава посвящена исследованию динамики слабых возмущений разной геометрии в полидисперсных парогасокапельных смесях с учетом нестационарных и неравновесных эффектов межфазного взаимодействия.

Система линейных интегро-дифференциальных уравнений движения полидисперсной парогасокапельной смеси имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p'_i}{\partial t} + \rho_{i0} \frac{\partial v'_i}{\partial r} + \theta \rho_{i0} \frac{v'_i}{r} &= - \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} N_0 j_{V\Sigma} da, \quad i = 1, V \\ \frac{\partial p'_2}{\partial t} + \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} \left(\frac{\partial v'_2}{\partial r} + \theta \frac{v'_2}{r} \right) N_0 g_0 da &= \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} N_0 j_\Sigma da, \\ \rho_{10} \frac{\partial v'_1}{\partial t} + \alpha_{10} \frac{\partial p'_1}{\partial r} + \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} f N_0 da &= 0, \quad g_0 \frac{\partial v'_2}{\partial t} = f, \end{aligned}$$

$$\rho_{10} c_{p1} \frac{\partial T_1'}{\partial t} - \alpha_{10} \frac{\partial p'}{\partial t} = - \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} N_0 q_{1\Sigma} da, \quad g_0 c_2 \frac{\partial T_2'}{\partial t} = -q_{2\Sigma},$$

$$q_{1\Sigma} + q_{2\Sigma} = -j_{\Sigma} l_0, \quad j_{V\Sigma} = j_{\Sigma}, \quad p_1' = p_V' + p_G',$$

$$\rho_1 = \alpha_1 \rho_1^0, \quad \rho_2 = \alpha_2 \rho_2^0, \quad \alpha_1 + \alpha_2 = 1, \quad \alpha_2 = \frac{4}{3} \pi a_0^3 n$$

Здесь и далее: ρ , ρ^0 , v , p , T – соответственно приведенная и истинная плотности, скорость, давление, температура; α_i – объемное содержание i -ой фазы ($i = 1,2$), n – число капель в единице объема смеси, a – радиус капль, N – функция распределения капль во взвеси по размерам; $q_{i\Sigma}$ – интенсивность теплообмена i – фазы с поверхностью капль ($i = 1,2$); $j_{V\Sigma}$ – диффузионный поток пара к поверхности капль Σ , j_{Σ} – интенсивность конденсации на поверхности отдельной капль; при значении параметра $\theta = 0$ система описывает плоские волны в декартовых координатах, при $\theta = 1$ – цилиндрические волны в цилиндрических координатах, при $\theta = 2$ – сферические волны в сферических координатах; индекс 1 относится к параметрам газообразной несущей фазы, индекс 2 – к параметрам дисперсной фазы; штрихи вверху используются для обозначения возмущения параметров; индекс 0 соответствует начальному невозмущенному состоянию; индексы V и G отмечают параметры паровой и газовой компонент несущей фазы.

Для замыкания системы задаются зависимости силового, теплового и массового взаимодействия фаз от частоты колебаний.

Рассматриваются решения записанной системы уравнений относительно возмущений потенциалов скоростей фаз.

Получено дисперсионное соотношение для комплексного волнового числа K_* , описывающее распространение как плоских, так и сферических и цилиндрических акустических возмущений и справедливое в широком диапазоне частот.

С использованием подпрограмм быстрого преобразования Фурье численно исследованы особенности распространения сферических и цилиндрических импульсных возмущений давления малой амплитуды в

полидисперсной взвеси.

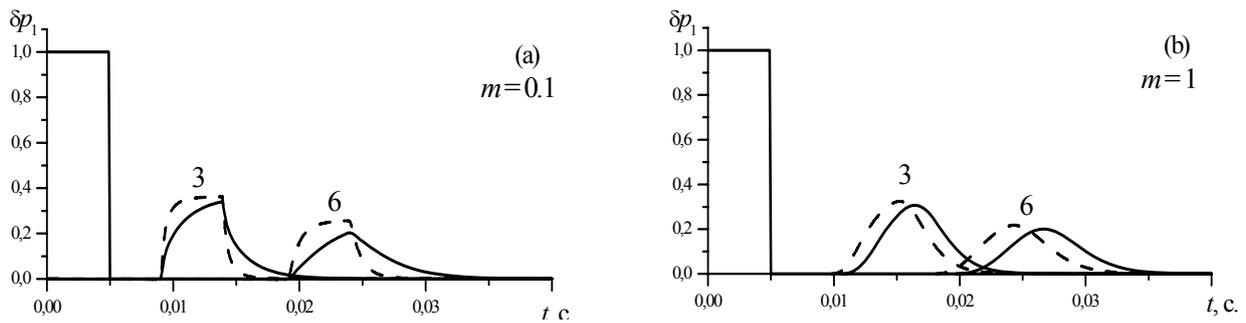


Рисунок 1 – Эволюция прямоугольного импульса в цилиндрическом случае при различном массовом содержании капель m , у кривых указано расстояние в метрах от места инициирования импульса; сплошные (штриховые) линии соответствуют случаю с учетом (без учета) межфазного теплообмена.

Показано, что акустические возмущения давления в сферическом случае в парогазокапельных смесях затухают сильнее, чем в цилиндрическом и плоском случаях. Установлено, что для акустических волн в парогазокапельных смесях, аналогично чистому газу, справедлива оценка, в соответствии с которой амплитуда импульса в цилиндрическом случае обратно пропорциональна квадратному корню от расстояния до места инициирования импульса. При учете межфазного теплообмена имеет место как более сильное затухание, так и более значительное изменение формы импульсов давления как в сферическом, так и в цилиндрическом случаях (сплошные линии рис.1), в силу большей дисперсии скорости распространения гармоник и диссипации возмущений.

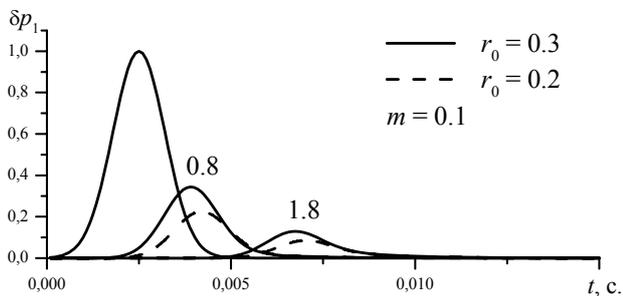


Рисунок 2 – Эволюция импульсного возмущения давления в цилиндрическом случае при различных значениях r_0

Дан анализ влияния радиуса возмущающей поверхности r_0 на затухание сферических и цилиндрических возмущений. Его уменьшение приводит к увеличению затухания импульсного возмущения в указанных случаях, что связано с изменением начальной площади поверхности волны.

В четвертой главе изучается распространение сферических и цилиндрических волн давления малой амплитуды в двухфазных смесях жидкости с пузырьками нерастворимого газа и в жидкости с пузырьками пара и газа.

Записана система линеаризованных уравнений сохранения масс, импульса, числа пузырьков, энергии и пульсационного движения для возмущений параметров среды.

Для более точного учета диссипации из-за неравновесного межфазного теплообмена используется решение уравнения теплопроводности внутри пузырьков. При описании радиального движения будем полагать, что массовая радиальная скорость жидкости на поверхности раздела фаз w состоит из двух слагаемых: $w = w_r + w_A$, где w_r , описывается уравнением Рэлея-Ламба, w_A - акустическая добавка.

Рассматриваются решения записанной системы уравнений относительно возмущений потенциалов скоростей фаз для плоского, сферического и цилиндрического случаев.

Получены единые дисперсионные соотношения, определяющие распространение как плоских, так сферических и цилиндрических возмущений в смесях жидкости с пузырьками нерастворимого газа и в смесях жидкости с парогазовыми пузырьками с учетом межфазного массообмена.

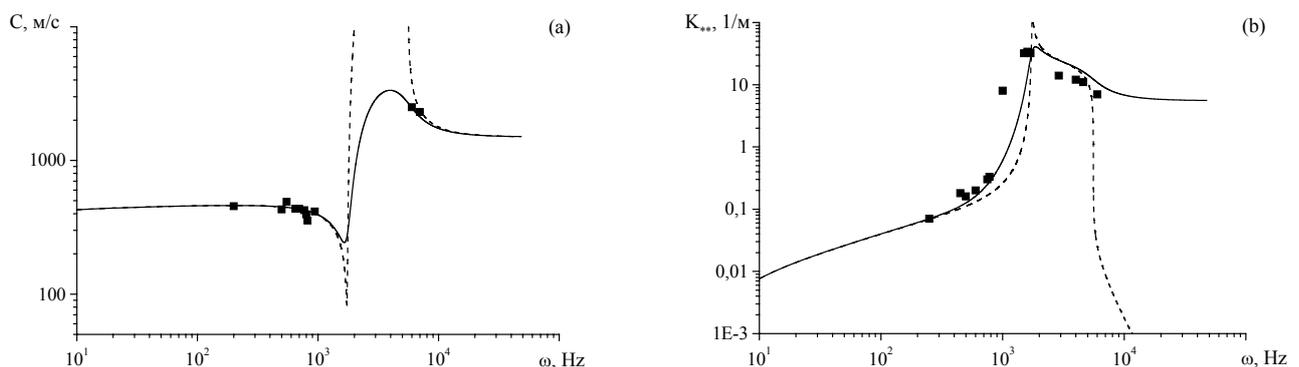


Рисунок 3 – Сравнение теории и экспериментальных данных (а) – для фазовой скорости, (б) – для затухания, $\alpha_{20} = 0.000584$, $a_0 = 1.89 \cdot 10^{-3}$ м.

Рассчитаны зависимости фазовой скорости и коэффициента затухания от частоты в смеси воды с пузырьками воздуха. Полученные результаты

сопоставляются с экспериментальными данными E. Silberman'a.

Показано, что акустические возмущения давления в сферическом случае в смесях жидкости с парогазовыми пузырьками затухают сильнее, чем в цилиндрическом и плоском случаях. Для акустических возмущений в пузырьковых жидкостях справедлива оценка, в соответствии с которой амплитуда импульса в цилиндрическом случае обратно пропорциональна расстоянию от места инициирования импульса.

Изучено влияние объемного содержания, начального радиуса пузырьков и массообмена на эволюцию импульсного возмущения давления в пузырьковых жидкостях. Увеличение объемного содержания пузырьков приводит к существенному уменьшению скорости распространения импульсного возмущения. Показано, что зависимость интенсивности затухания длинноволнового импульса от радиуса пузырьков немонотонна – при уменьшении радиуса пузырьков до некоторого значения затухание сначала постепенно увеличивается, а затем уменьшается.

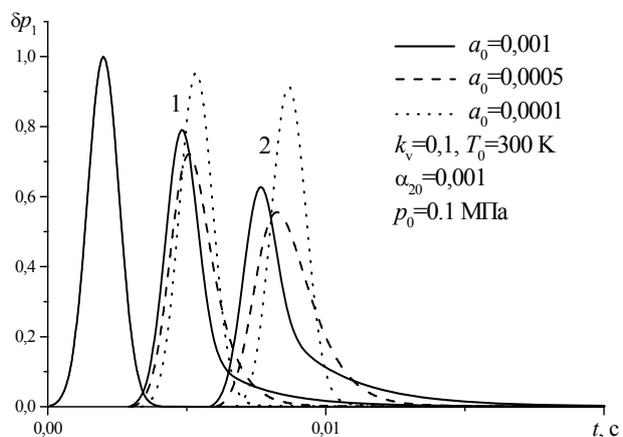


Рисунок 4 – Влияние начального радиуса пузырьков на эволюцию импульсного возмущения давления в смеси воды с парогазовыми пузырьками.

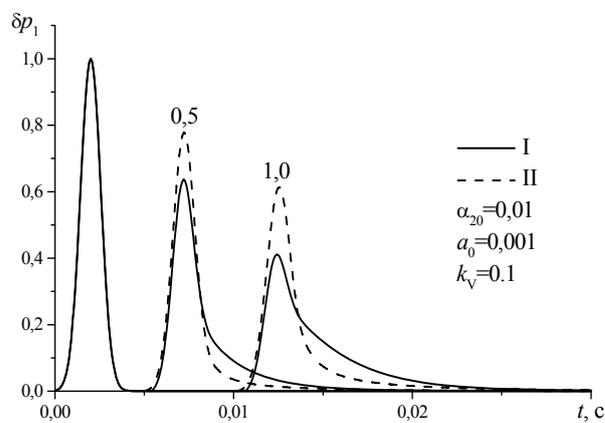


Рисунок 5 – Эволюция импульсного возмущения давления в жидкости с парогазовыми (кривая I) и газовыми (кривая II) пузырьками

Для смеси жидкости с парогазовыми пузырьками при наличии диффузионного массообмена рассчитаны и представлены зависимости фазовой скорости и коэффициента затухания от частоты.

Основные результаты и выводы:

1. Представлены замкнутые системы линейных интегро-дифференциальных уравнений движения для моно- и полидисперсных парогазокапельных сред и для смеси жидкости с парогазовыми пузырьками с учетом диффузионного массообмена в случаях осевой и центральной симметрии. Из условия существования у записанных систем уравнений решений в виде возмущений для потенциалов скоростей фаз выведены общие дисперсионные соотношения, определяющие распространение сферических и цилиндрических возмущений в моно- и полидисперсных газовзвесах и в смесях жидкости с пузырьками пара и газа. Для длинноволновых возмущений в монодисперсных газовзвесах получено волновое уравнение, которое совпадает в плоском случае с известным волновым уравнением.
2. Для сферических и цилиндрических случаев изучена эволюция линейных импульсных возмущений разной начальной формы в полидисперсных смесях воздуха с паром и каплями воды с учетом фазовых превращений. Установлено, что небольшое изменение радиуса возмущающей поверхности достаточно сильно влияет на затухание сферических и цилиндрических волн в полидисперсных взвесах. Уменьшение радиуса возмущающей поверхности приводит к увеличению затухания импульсного возмущения в указанных случаях, что связано с изменением начальной площади поверхности волны. Дан сравнительный анализ решений для плоского, сферического и цилиндрического случаев. Эволюция акустических возмущений давления в парогазокапельных системах существенно зависит от геометрии процесса, что обуславливает существенно более сильное затухание импульсного возмущения в сферическом случае по сравнению с цилиндрическим и плоским случаем.
3. Исследована эволюция импульсных возмущений давления в смесях жидкости с парогазовыми и газовыми пузырьками. Проанализировано влияние начального объемного содержания пузырьков и начального радиуса пузырьков. Показана немонотонная зависимость затухания

импульсного возмущения давления от начального радиуса пузырьков в пузырьковых жидкостях с учетом и без учета диффузионного массообмена.

4. Для акустических возмущений в цилиндрическом случае, как в парогазокапельных системах, так и в пузырьковых жидкостях справедлива оценка, согласно которой величина амплитуды возмущения импульса давления обратно пропорциональна квадратному корню от расстояния до места инициирования импульса.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Никифоров А.А.** Динамика сферических и цилиндрических волн малой амплитуды в полидисперсных газовзвесьях [Текст] / Д.А. Губайдуллин, С.А. Лаптев, А.А. Никифоров // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. – 2000. – Т. 5-6. – С. 17-24.
2. **Никифоров А.А.** Малые возмущения разной геометрии в полидисперсных парогазокапельных смесях с фазовыми переходами. [Текст] / Д.А. Губайдуллин, С.А. Лаптев, А.А. Никифоров // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. – 2001. – Т.9-10. – С.26-33.
3. **Никифоров А.А.** Акустические возмущения разной геометрии в смеси жидкости с пузырьками нерастворимого газа [Текст] / Д.А. Губайдуллин, А.А. Никифоров // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. – 2005. – Т.1-2. – С.3-10.
4. **Никифоров А.А.** Слабые волны разной геометрии в смеси жидкости с пузырьками пара и газа [Текст] / Д.А. Губайдуллин, А.А. Никифоров // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. – 2006. – Т.9-10. – С.15-21.
5. **Никифоров А.А.** Динамика смесей жидкости с пузырьками нерастворимого газа. Сравнение теории с экспериментом [Текст] / Д.А. Губайдуллин, А.А. Никифоров // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. – 2007. – Т.1-2. – С.3-7.

Публикации в научных сборниках:

6. **Никифоров А.А.** Слабые волны разной геометрии в полидисперсных туманах с фазовыми превращениями. [Текст] / Д.А. Губайдуллин, С.А. Лаптев, А.А. Никифоров // Актуальные проблемы механики сплошной

среды. К 10-летию ИММ КазНЦ РАН. – Казань: Ин-т механики и машиностроения КазНЦ РАН, 2001. – С. 60-68.

7. **Никифоров А.А.** Малые возмущения в полидисперсных смесях газа с паром и каплями жидкости в сферическом и цилиндрическом случаях. [Текст] / Д.А. Губайдуллин, А.А. Никифоров // Динамика газовых пузырьков и аэрозолей. – Казань: Институт механики и машиностроения КазНЦ РАН, 2003. – С.261-286.
8. **Никифоров А.А.** Линейные волны разной геометрии в двухфазных смесях жидкости с пузырьками газа [Текст] / Д.А. Губайдуллин, А.А. Никифоров // Актуальные проблемы механики сплошной среды. К 70-летию чл.-корр. РАН М.А. Ильгамова. – Казань: Институт механики и машиностроения КазНЦ РАН, 2004. – С.36-45.
9. **Никифоров А.А.** Акустические возмущения в смеси жидкости с пузырьками пара и газа. Сравнение теории с экспериментом [Текст] / Д.А. Губайдуллин, А.А. Никифоров // Актуальные проблемы механики сплошной среды. К 15-летию ИММ КазНЦ РАН. Казань: Изд-во КГУ, 2006. – С. 61-71.

Публикации в трудах международных конференций:

10. **Никифоров А.А.** Распространение плоских, сферических и цилиндрических возмущений малой амплитуды в полидисперсных парогазокапельных смесях [Текст] / Д.А. Губайдуллин, С.А. Лаптев, А.А. Никифоров // Труды II Международного симпозиума. “Актуальные проблемы механики сплошных и сыпучих сред”. – Москва: НАПН, 1999. – С.50.
11. **Никифоров А.А.** Плоские, сферические и цилиндрические волны малой амплитуды в полидисперсных парогазокапельных системах [Текст] / Д.А. Губайдуллин, С.А. Лаптев, А.А. Никифоров // Материалы III Международной научной школы-семинара “Импульсные процессы в механике сплошных сред”. – Николаев (Украина), 1999. – С.26-27.
12. **Никифоров А.А.** Линейные волны разной геометрии в дисперсных средах [Текст] / Д.А. Губайдуллин, А.А. Никифоров // Труды Матем. центра им. Н.И. Лобачевского. Т.27. Модели механики сплошной среды. Материалы XVII сессии Межд. школы по моделям механики

сплошной среды, Казань, 4 – 10 июля 2004г. – Казань: Изд-во Казан. матем. об-ва, 2004. – С. 96-102.

Публикации в трудах всероссийских конференций:

13. **Никифоров А.А.** Распространение сферических и цилиндрических волн малой амплитуды в газовзвесьях [Текст] / Д.А. Губайдуллин, С.А. Лаптев, А.А. Никифоров // Труды Школы–семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН В.Е. Алемасова “Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении”. – Казань, 1999. – С.153-154.
14. **Никифоров А.А.** Эволюция сферических и цилиндрических волн малой амплитуды в газовзвесьях [Текст] / Д.А. Губайдуллин, С.А. Лаптев, А.А. Никифоров // Труды Школы–семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН В.Е. Алемасова “Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении”. – Казань, 2000. – С. 43-45.
15. **Никифоров А.А.** Динамика сферических и цилиндрических волн малой амплитуды в газовзвесьях. [Текст] // Труды Школы–семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН В.Е. Алемасова “Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении”. – Казань, 2002. – С.65-66.
16. **Никифоров А.А.** Распространение акустических возмущений в смеси жидкости с пузырьками газа при учете межфазного теплообмена [Текст] // Труды V Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН В.Е. Алемасова. – Казань, 2006. – С.133-135.