

Динамика и акустика полидисперсных газокапельных и пузырьковых сред. Теория и эксперимент¹

Губайдуллин Д.А.

Институт механики и машиностроения КазНЦ РАН, Казань

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований волновой динамики и акустики газокапельных и пузырьковых сред. Исследовано распространение слабых волн в парогазовых полидисперсных (с произвольной функцией распределения включений по размерам) и дискретных многофракционных капельных и пузырьковых средах с фазовыми превращениями. Разработаны математические модели, получены дисперсионные соотношения, изучены высоко- и низкочастотные асимптотики коэффициента затухания, обсуждаются области применимости развитых теорий. Показано хорошее согласие представленных результатов с опубликованными экспериментальными данными других авторов.

Экспериментально изучены нелинейные колебания газовзвесей и динамика частиц в трубах в ударно- и безударно, а также в переходном волновом режимах. Показан резонансный характер осаждения капель от частоты колебаний и возможность эффективного акустического осаждения наиболее проблемных субмикронных капель. На основе алгоритмов быстрого преобразования Фурье выполнен расчет искажения акустического сигнала при диагностике многослойного образца, содержащего слой жидкости с полидисперсными пузырьками. Получено хорошее согласование теоретических и экспериментальных данных.

Ключевые слова: волновая динамика, газокапельные и пузырьковые среды

В настоящей работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований волновой динамики и акустики двухфазных сред. Проанализированы волновые процессы в газокапельных смесях и пузырьковых жидкостях. Ранее ряд проблем по этой теме был рассмотрен в работах [1–32].

Рассмотрены некоторые эффекты и особенности акустики и волновой динамики газокапельных сред и смеси жидкости с пузырьками газа и пара, в том числе эффекты немонотонной зависимости затухания волн от массового содержания капель и концентрации паровой компоненты в парогазокапельной среде, эффект немонотонной зависимости затухания волн от радиуса пузырьков в пузырьковых жидкостях с фазовыми и без фазовых превращений. Показано, что с ростом начальной кон-

центрации пара в парогазовых пузырьках скорость распространения волн существенно уменьшается, а их затухание значительно возрастает. При этом влияние паросодержания на динамику акустических возмущений существенно увеличивается с ростом начального объемного содержания пузырьков.

Развита континуальная теория распространения слабых волн в парогазовых полидисперсных (с произвольной функцией распределения включений по размерам) и дискретных многофракционных капельных и пузырьковых средах с фазовыми превращениями. Разработаны математические модели, получены дисперсионные соотношения, изучены высоко- и низкочастотные асимптотики коэффициента затухания, обсуждаются области применимости развитых теорий. Для случая смеси воздуха с паром, каплями воды и частицами песка и сажи рассчитаны дисперсионные кривые и распространение импульсных возмущений. Показано, что наличие загрязняющих примесей существенно влияет на динамику слабых волн в воздушных туманах.

¹Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-11-10016).

Для случая смеси воды с паровоздушными пузырьками и пузырьками гелия или углекислого газа рассчитаны дисперсионные кривые и динамика слабых импульсов давления. Установлено, что замена части паровоздушных пузырьков в монодисперсной пузырьковой смеси с фазовыми переходами на пузырьки с инертным гелием и парами воды может приводить к существенному увеличению затухания волн в низкочастотной области частот. Показано хорошее согласование представленных теорий с опубликованными экспериментальными данными других авторов.

Теоретически исследовано распространение акустических возмущений в многофракционной смеси жидкости с полидисперсными парогазовыми и газовыми пузырьками различных размеров и разного состава с фазовыми превращениями. Проиллюстрировано хорошее согласование теоретических кривых фазовой скорости и коэффициента затухания с экспериментальными данными, в том числе в диапазоне около резонансных частот. Разработан теоретический метод расчета искажения акустического сигнала при его взаимодействии с многослойной преградой, содержащей слой полидисперсной пузырьковой жидкости. Представлены результаты расчета эволюции импульсного возмущения давления малой амплитуды на основании данных эксперимента, полученных при диагностике многослойных образцов, содержащих слои пузырьковых жидкостей (рис. 1). Получено хорошее согласование результатов теоретических расчетов с данными эксперимента. Установлено, что особые дисперсионные и диссипативные свойства слоя пузырьковой жидкости существенно влияют на динамику акустического сигнала в многослойной среде в зависимости от основной частоты сигнала. Показано, что с использованием полученного метода можно проводить верификацию теоретических моделей динамики газожидкостных сред на основе экспериментальных данных.

Теоретически исследовано наклонное падение акустической волны на слой газожидкостной смеси или пузырьковой жидкости конечной толщины. Для случая падения низкочастотной акустической волны на границу раздела между чистым газом и газожидкостью, а также на границу между чистой и пузырьковой жидкостью установлены основные закономерности отражения и прохождения волны. Данное обстоятельство позволяет оценить коэффициент прохождения и отражения в зависимости от объемного содержания включений и угла падения акустической волны. В частности, для границы раздела между чистым газом и газожидкостью получены аналитические выражения критического угла паде-

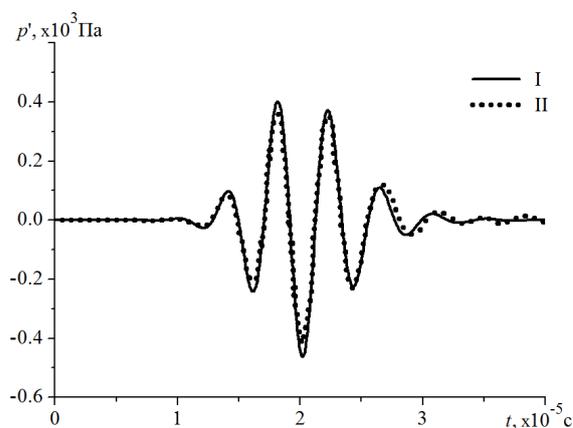


Рис. 1. Импульс давления с основной частотой 0.25 МГц, прошедший через трехслойную преграду с пузырьковым слоем: I — результаты расчета; II — экспериментальные данные ([34])

ния волны, при которых коэффициент отражения принимает нулевые значения, т.е. тем самым наблюдается полное прохождение акустической волны через границу раздела. Эти выражения позволили установить, что когда волна падает со стороны газожидкостной смеси на границу чистого газа, то при углах падения выше 24.5° коэффициент отражения никогда не будет равняться нулю, однако, если волна падает со стороны чистого газа на границу газожидкости, нулевое значение коэффициента отражения возможно при любых ненулевых углах падения и объемного содержания включений. Показано, что граница между чистой и пузырьковой жидкостью не обладает данным свойством полного прохождения акустической волны ни при каких значениях угла падения волны и объемного содержания пузырьков. Данные выводы оказались справедливыми не только для границы, но и для слоя двухфазной среды конечной толщины.

На основе результатов расчетов отражения акустической волны от слоя конечной толщины, содержащей газожидкость или пузырьковую жидкость, установлены соотношения между длиной волны и толщиной слоя, при которых коэффициент отражения принимает экстремальные значения, что проиллюстрировано на рис. 2, где показано сопоставление теории с имеющимися экспериментальными данными. Установлено, что увеличение угла падения акустической волны на границу или слой газожидкости приводит: во-первых, как к увеличению, так и к уменьшению коэффициента отражения на низких частотах, во-вторых, к появлению дополнительных минимумов в зависимости коэффициента отражения от частоты возмущений, связанных

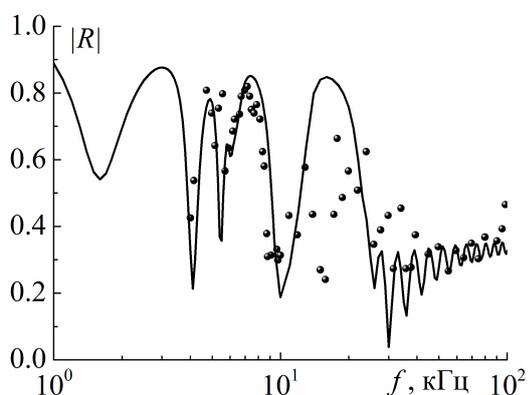


Рис. 2. Сравнение зависимости коэффициента отражения от частоты возмущений с экспериментальными данными для среды «вода-пузырьковая жидкость-воздух» ([35])

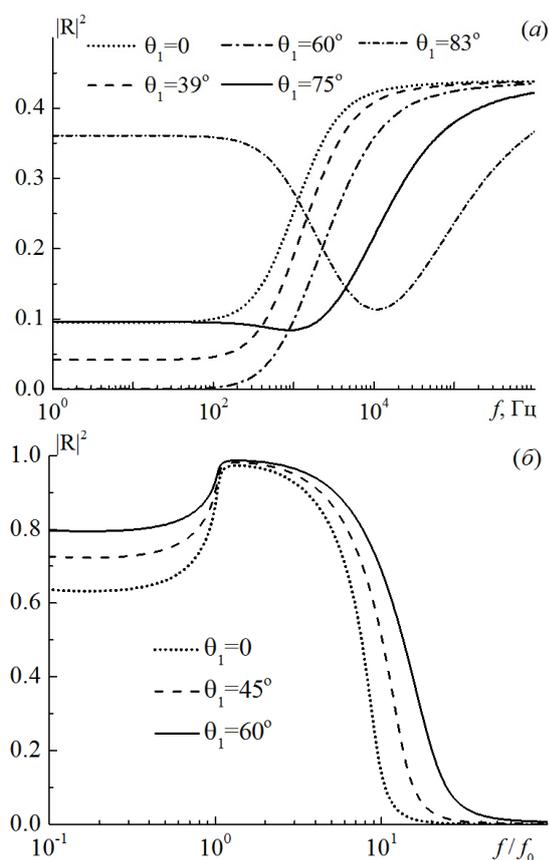


Рис. 3. Зависимости коэффициента отражения от частоты возмущений при различных углах падения волны для сред «воздух-газовзвесь» (а) и «вода-пузырьковая жидкость» (б); объемное содержание капель воды и пузырьков воздуха составляло $\alpha = 0.005$, радиус капель — 5 мкм, радиус пузырьков — 0.5 мм, $f_0 = 6523$ Гц

с различием скорости и плотности сред (рис. 3). Найдены интервалы угла падения, при которых эти минимумы возникают. В то время, как увеличение угла падения волны на границу или слой пузырьковой жидкости приводит только к увеличению коэффициента отражения. В данной среде дополнительные минимумы не возникают, поскольку плотность пузырьковой жидкости близка к плотности чистой жидкости. Результаты данной теории в частном случае нормального падения волны хорошо согласуются с теоретическими и экспериментальными данными других авторов.

Изучены нелинейные колебания аэрозолей и динамика частиц в трубах в ударно- и безударно-волновом режимах. Установлен резонансный характер осаждения капель от частоты акустического поля и возможность эффективного акустического осаждения наиболее проблемных субмикронных капель.

Получена формула для суммарной силы, действующей на сферическое включение, с учетом сжимаемости несущей фазы и включения. Выведена формула для частоты, при переходе через которую суммарная сила меняет направление. Предложена диаграмма влияния частоты и отношения невозмущенной плотности несущей фазы к плотности включения на направление дрейфа. Изучено влияние силы Бассэ.

Список литературы

- [1] Губайдуллин Д.А. Динамика двухфазных парогазокапельных сред. Изд-во Казанского математического общества, 1998. 153 с.
- [2] Gubaidullin D.A., Nigmatulin R.I. On theory of acoustic waves in polydispersed gas-vapor-droplet suspension // Intern. J. Multiphase Flow. 2000. V. 26, No. 2. P. 207–228.
- [3] Губайдуллин Д.А. Сферические и цилиндрические волны малой амплитуды в полидисперсных туманах с фазовыми превращениями // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2003. № 5. С. 85–94.
- [4] Губайдуллин Д.А., Никифоров А.А. Акустические возмущения в смеси жидкости с пузырьками пара и газа // Теплофизика высоких температур. 2010. Т. 48, № 2. С. 188–192. (High Temperature, 48:2 (2010), 170–175).
- [5] Губайдуллин Д.А., Никифоров А.А., Уткина Е.А. Акустические волны в двухфракционных смесях газа с паром, каплями и твердыми частицами разных материалов и размеров при наличии фазовых превращений // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2011. № 1. С. 83–89.

- [6] Губайдуллин Д.А., Федоров Ю.А. Распространение малых возмущений в полидисперсной парогазокапельной смеси с полидисперсными частицами при наличии фазовых превращений // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2012. № 5. С. 43–51.
- [7] Губайдуллин Д.А., Никифоров А.А., Уткина Е.А. Влияние фазовых превращений на акустику смеси газа с паром, каплями и твердыми частицами // Теплофизика высоких температур. 2011. Т. 49, № 6. С. 942–947. (High Temperature, 49:6 (2011), 911–916).
- [8] Губайдуллин Д.А., Терегулова Е.А., Губайдуллина Д.Д. Распространение акустических волн в многофракционных газовзвесах // Теплофизика высоких температур. 2015. Т. 53, № 2. С. 752–757. (High Temperature, 53:5 (2015), 714–719).
- [9] Губайдуллин Д.А., Федоров Ю.А. Сферические и цилиндрические волны в парогазовых смесях с полидисперсными частицами и каплями // Теплофизика высоких температур. 2012. Т. 50, № 5. С. 659–664. (High Temperature, 50:5 (2012), 616–620).
- [10] Губайдуллин Д.А., Никифоров А.А. Акустические возмущения в смеси жидкости с пузырьками пара и газа // Теплофизика высоких температур. 2010. Т. 48, № 2. С. 188–192. (High Temperature, 48:2 (2010), 170–175).
- [11] Губайдуллин Д.А., Никифоров А.А., Гафиятов Р.Н. Акустические волны в двухфракционных пузырьковых жидкостях с фазовыми превращениями // Теплофизика высоких температур. 2012. Т. 50, № 2. С. 269–273. (High Temperature, 50:2 (2012), 250–254).
- [12] Нигматулин Р.И., Губайдуллин Д.А., Федоров Ю.В. Звуковые волны в двухфракционных полидисперсных пузырьковых жидкостях // Доклады Академии Наук. 2012. Т. 447, № 3. С. 284–287.
- [13] Нигматулин Р.И., Губайдуллин Д.А., Федоров Ю.В. Акустические волны разной геометрии в полидисперсных пузырьковых жидкостях. Теория и эксперимент // Доклады Академии наук. 2013. Т. 450, № 6. С. 665–669.
- [14] Губайдуллин Д.А., Никифоров А.А., Гафиятов Р.Н. Распространение акустических волн в двухфракционных пузырьковых жидкостях с учетом фазовых превращений в каждой из фракций // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2013. № 3. С. 91–98.
- [15] Губайдуллин Д.А., Никифоров А.А., Гафиятов Р.Н. Акустические волны в многофракционных пузырьковых жидкостях // Теплофизика высоких температур. 2015. Т. 53, № 2. С. 250–255. (High Temperature, 53:2 (2015), 240–245).
- [16] Нигматулин Р.И., Губайдуллин Д.А., Никифоров А.А. Динамика импульсных волн в пузырьковых жидкостях. Сравнение теории с экспериментом // Доклады Академии наук. 2014. Т. 456, № 6. С. 662–664.
- [17] Губайдуллин Д.А., Губайдуллина Д.Д., Федоров Ю.В. Акустические волны в жидкостях с полидисперсными пузырьками газа. Сравнение теории с экспериментом // Известия РАН. МЖГ. 2013. № 6. С. 81–90.
- [18] Губайдуллин Д.А., Федоров Ю.В. Звуковые волны в двухфракционных полидисперсных пузырьковых средах // Прикладная математика и механика. 2013. Т. 77, № 5. С. 743–753.
- [19] Губайдуллин Д.А., Федоров Ю.В. Звуковые волны в жидкостях с полидисперсными парогазовыми и газовыми пузырьками // Известия РАН. МЖГ. 2015. № 1. С. 67–77.
- [20] Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Галиуллин Р.Г., Галиуллина Э.Р., Ткаченко Л.А. Экспериментальное исследование коагуляции аэрозоля в трубе вблизи субгармонического резонанса // Теплофизика высоких температур. 2004. Т. 42. С. 788–795. (High Temperature, 42:5 (2004), 794–802).
- [21] Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Ткаченко Л.А. Экспериментальное исследование коагуляции и осаждения аэрозоля в закрытой трубе в безударно-волновом режиме // Теплофизика высоких температур. 2012. Т. 50, № 4. С. 603–605. (High Temperature, 50:4 (2012), 564–566).
- [22] Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Ткаченко Л.А. Экспериментальное исследование колебаний аэрозоля в трубах в безударно-волновом режиме вблизи резонанса // Доклады Академии наук. 2013. Т. 52, № 2. С. 161–164.
- [23] Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Ткаченко Л.А. Экспериментальное исследование колебаний аэрозоля в открытой трубе в безударно-волновом режиме // Теплофизика высоких температур. 2013. Т. 51, № 6. С. 955–957. (High Temperature, 51:6 (2013), 873–875).
- [24] Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Ткаченко Л.А. Резонансные колебания аэрозоля в трубе с диафрагмой в безударно-волновом режиме // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52, № 6. С. 921–926. (High Temperature, 52:6 (2014), 895–899).
- [25] Gubaidullin D.A., Ossipov P.P. Numerical investigation of particle drift in acoustic resonator with periodic shock wave // Applied Mathematics and Computation. 2013. V. 219. P. 4535–4544.

- [26] Губайдуллин Д.А., Никифоров А.А., Гафиятов Р.Н. Акустические волны в многофракционных пузырьковых жидкостях // Теплофизика высоких температур. 2015. Т. 53, № 2. С. 250–255. (High Temperature, 53:2 (2015), 240–245).
- [27] Губайдуллин Д.А., Федоров Ю.В. Звуковые волны в жидкостях с полидисперсными парогазовыми и газовыми пузырьками // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2015. № 1. С. 67–77.
- [28] Губайдуллин Д.А., Федоров Ю.В. Звуковые волны в жидкости с полидисперсными парогазовыми пузырьками // Акустический журнал. 2016. Т. 62, № 2. С. 178–186.
- [29] Губайдуллин Д.А., Федоров Ю.В. Отражение акустической волны от пузырькового слоя конечной толщины // Доклады академии наук. 2016. Т. 470, № 5. С. 525–527.
- [30] Нигматулин Р.И., Губайдуллин Д.А., Тукмаков Д.А. Ударно-волновой разлет газозвесей // Доклады Академии наук. 2016. Т. 466, № 4. С. 418–421.
- [31] Губайдуллин Д.А., Федоров Ю.В. Падение акустической волны на многослойную среду, содержащую слой пузырьковой жидкости // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2017. № 1. С. 109–116.
- [32] Губайдуллин Д.А., Никифоров А.А. Взаимодействие акустического сигнала с неподвижной дискретно-слоистой средой, содержащей слой пузырьковой жидкости // Теплофизика высоких температур. 2017. Т. 55, № 1. С. 102–107. (High Temperature, 55:1 (2017), 95–100).
- [33] Leroy V., Strybulevych A., Page J.H. Sound velocity and attenuation in bubbly gels measured by transmission experiments // JASA. 2008. V. 123, No. 4. P. 1931–1940.
- [34] Kang Il Lee, Bok Kyoung Choi, Suk Wang Yoon Acoustic Pressure Reflection Coefficients of a Subsurface Bubble Layer in Water // J. Korean Phys. Soc. 2002. V. 40, No. 2. P. 256–263.

Dynamics and acoustics of polydisperse gas-droplet and bubbling media. Theory and experiment

Gubaidullin D.A.

Institute of Mechanics and Engineering, Kazan

The results of theoretical and experimental studies of wave dynamics and acoustics of gas-droplet and bubbling media are presented. The propagation of weak waves in the vapor-gas polydisperse media (with an arbitrary distribution function of the size of inclusions) and discrete multifraction droplet and bubbling media with phase transformations is studied. Mathematical models have been developed, dispersion relations have been obtained, high- and low-frequency asymptotics of the damping coefficient have been studied, and the areas of applicability of the developed theories are discussed. Good agreement of the presented results with the published experimental data by other authors is shown.

The nonlinear oscillations of gas suspensions and the dynamics of particles in tubes in the shock and shockless regimes as well as in the transient wave one have been experimentally studied. The resonance character of the droplet deposition with the oscillation frequency and the possibility of effective acoustic deposition of the most problematic submicron drops are shown. Based on the fast Fourier transform algorithms, the acoustic signal distortion during the diagnostics of a multilayer sample containing a liquid layer with polydisperse bubbles has been calculated. Good agreement between the theoretical and experimental data has been obtained.

Keywords: wave dynamics, gas-droplet and bubble media



Многофазные системы:
модели, эксперимент, приложения

ИМех им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

Статья рекомендована к публикации
Программным комитетом VI Российской конференции
«Многофазные системы: модели, эксперимент, приложения»