

УДК 532.529:534.2

РАСПРОСТРАНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В МНОГОФРАКЦИОННЫХ СМЕСЯХ ЖИДКОСТИ С ПУЗЫРЬКАМИ ГАЗА

Р.Н. Гафиятов

Аннотация

Исследовано распространение акустических волн в многофракционных смесях жидкости с парогазовыми и газовыми пузырьками различных размеров и разного состава с фазовыми превращениями. Представлена система дифференциальных уравнений движения смеси, выведено дисперсионное соотношение. Показано, что дисперсия и диссипация акустических волн значительно зависят от присутствия в составе дисперсной фазы пузырьков различных фракций. **Ключевые слова:** линейные волны, пузырьковая жидкость, межфазный теплообмен, дисперсионное соотношение

1. Введение

В настоящее время значительный интерес представляют исследования волновой динамики дисперсных сред. Значительное количество работ по акустике пузырьковых жидкостей посвящено теоретическому исследованию распространения гармонических возмущений в монодисперсных смесях. Различные проблемы акустики смесей жидкостей с пузырьками газа или пара рассмотрены в известных монографиях [1, 2]. Работа [3] посвящена описанию основных особенностей двухфазных сред пузырьковой структуры. Приведен обзор работ по распространению волн в жидкостях с пузырьками постоянной массы и работ по волновой динамике жидкостей, содержащих пузырьки пара или растворимого газа. В [4], для смеси жидкости с газовыми пузырьками, получена дисперсионная зависимость волнового числа от частоты колебаний и теплофизических свойств фаз в плоском случае, показана необходимость учета сжимаемости несущей фазы для задач акустики пузырьковых жидкостей. В работе [5] в рамках трехтемпературной модели исследуется распространение малых возмущений в двухкомпонентной двухфазной смеси. Показано, что дисперсия определяется неравновесностью теплопереноса, а не эффектами скольжения фаз. Модель распространения плоских волн давления малой амплитуды в смеси жидкости с пузырьками газа представлена в работе [6]. Показано, что модель работает хорошо при объемных содержаниях дисперсной фазы 1-2% и только для дорезонансных частот. В [7] получено дисперсионное соотношение, определяющее распространение гармонических возмущений в двухфазных смесях жидкости с пузырьками пара и газа для сферического и цилиндрического случая. Показано сильное влияние значения концентрации пара в пузырьках на затухание импульсных волн. В [8] исследовано распространение акустических волн в двухфракционных смесях жидкости с парогазовыми и газовыми пузырьками различных размеров и разного состава с фазовыми превращениями. В [9] исследовано распространение акустических волн в двухфракционных смесях жидкости с парогазовыми пузырьками различных размеров и разного состава с фазовыми превращениями в каждой из фракций. В [10] изучено распространение

акустических волн разной геометрии в двухфракционных смесях жидкости с полидисперсными газовыми пузырьками разного состава. В настоящей работе впервые изучается динамика слабых возмущений в многофракционных смесях жидкости с парогазовыми и газовыми пузырьками различных размеров и разного состава.

2. Дисперсионное соотношение

Рассматривается плоское одномерное движение многофракционной пузырьковой жидкости, дисперсная фаза которой состоит из $N+M$ фракций пузырьков в акустическом поле. Пузырьки каждой из фракций имеют размеры, отличные от пузырьков других рассматриваемых фракций. Газ, из которого состоят пузырьки каждой из фракций, отличается по своим теплофизическим свойствам от газов в пузырьках других фракций. При этом N фракций пузырьков участвует в фазовых превращениях, M фракций пузырьков – нет. Записывается линеаризованная система уравнений, которая будет иметь вид аналогичный [8], но с учетом многофракционности состава дисперсной фазы. Решая эту систему, получается следующая дисперсионная зависимость комплексного волнового числа K_* от частоты ω :

$$\begin{aligned} \left(\frac{K_*}{\omega}\right) &= \frac{1}{C_f^2} + \frac{\rho_{10}}{p_0} \frac{\left(\sum_{i=1}^M H_{3i} + \sum_{j=1}^N H_{3j}\right) \left(\sum_{i=1}^M H_{1i} + \sum_{j=1}^N H_{1j}\right)}{\sum_{i=1}^M \left(\frac{m_i}{\tau_{T1i}} + H_{2i}\right) + \sum_{j=1}^N \left(\frac{m_j}{\tau_{T1j}} + H_{2j}\right) - i\omega} + \\ &+ \frac{\rho_{10}}{p_0} \sum_{i=1}^M \left(\frac{\alpha_{20i}}{N_{Ri}} \left(1 - \frac{M_{4i}}{M_{3i}}\right)\right) + \frac{\rho_{10}}{p_0} \sum_{j=1}^N \left(\frac{\alpha_{20j}}{N_{Rj}} \left(1 - \frac{M_{4j}}{M_{3j}}\right)\right) \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь C_f – замороженная скорость звука ($C_f = C_1/\alpha_{10}$), а также приняты следующие обозначения:

$$\begin{aligned} H_{1j} &= \frac{m_j}{\tau_{T1j}} \left(\frac{M_{1j}M_{4j}}{M_{3j}} + M_{2j}\right), \quad H_{1i} = \frac{m_i}{\tau_{T1i}} \left(\frac{M_{1i}M_{4i}}{M_{3i}} + M_{2i}\right), \quad H_{2j} = \frac{m_j}{\tau_{T1j}} \frac{M_{1j}b_j}{M_{3j}}, \\ H_{2i} &= \frac{m_i}{\tau_{T1i}} \frac{M_{1i}b_i}{M_{3i}}, \quad H_{3j} = \frac{\alpha_{j0}}{N_{Rj}} \frac{b_j}{M_{3j}}, \quad H_{3i} = \frac{\alpha_{i0}}{N_{Ri}} \frac{b_i}{M_{3i}}, \quad M_{1j} = G_j - M_{2j} - \frac{L_{1j}N_{3j}}{L_{4j} - \delta N_{2j}}, \\ M_{2j} &= \frac{N_{2j}L_{1j}}{N_{Rj}(L_{4j} - \delta N_{2j})}, \quad M_{3j} = \frac{N_{3j}\delta - L_{2j}N_{3j}}{L_{4j} - \delta N_{2j}} + L_{3j} + M_{4j}, \quad M_{4j} = \frac{L_{4j} - L_{2j}N_{2j}}{N_{Rj}(L_{4j} - \delta N_{2j})}, \\ M_{1i} &= -(N_{3i} + M_{2i}), \quad M_{2i} = \frac{N_{2i}}{N_{Ri}}, \quad M_{3i} = 1 + N_{3i}(1 + b_i) + M_{4i}, \\ M_{4i} &= \frac{1}{N_{Ri}}(1 + N_{2i}(1 + b_i)), \quad N_{1j} = \frac{i\omega\tau_{T1j}}{m_j} - 1, \quad N_{1i} = 1, \quad N_{2j} = i\omega\tau_{Tj} - 1, \\ N_{3j} &= k_{2j}(c_j - R_j) - 1 + G_j, \quad N_{3i} = k_{2i}(c_i - R_i) - 1, \quad L_{1j} = E_j(1 - i\omega\tau_j), \\ L_{2j} &= -\frac{l_0k_{2j}}{(1 - kv_{j0})T_0} + \Delta R_j - L_{1j}(1 + b_j), \quad L_{3j} = 1 - G_j(1 + b_j), \quad L_{4j} = L_{1j} + \Delta R_j N_{2j}, \\ N_{Rj} &= -\frac{\rho_{10}^\circ (i\omega)(a_{j0})^2 G_{Rj}}{p_0 3(t_{Aj}G_{Rj} + 1)}, \quad N_{Ri} = -\frac{\rho_{10}^\circ (i\omega)(a_{i0})^2 G_{Ri}}{p_0 3(t_{Ai}G_{Ri} + 1)}, \quad G_{Rj} = \frac{1}{t_{Rj}} - i\omega, \quad G_{Ri} = \frac{1}{t_{Ri}} - i\omega, \\ t_{Rj} &= \frac{(a_{j0})^2}{4\nu_1}, \quad t_{Ri} = \frac{(a_{i0})^2}{4\nu_1}, \quad t_{Aj} = \frac{a_{j0}}{C_1(\alpha_{j0})^{1/3}}, \quad t_{Ai} = \frac{a_{i0}}{C_1(\alpha_{i0})^{1/3}}, \\ m_{j0} &= \frac{\rho_{j0}^\circ}{\rho_{10}^\circ}, \quad m_{i0} = \frac{\rho_{i0}^\circ}{\rho_{10}^\circ}, \quad m_j = \frac{\rho_{j0}}{\rho_{10}}, \quad m_i = \frac{\rho_{i0}}{\rho_{10}}, \quad i = \overline{1, M}, \quad j = \overline{1, N}. \end{aligned}$$

Дисперсионная зависимость (1) комплексного волнового числа K_* от частоты колебаний ω определяет распространение акустических возмущений в многофракционных смесях жидкости с парогазовыми и газовыми пузырьками (разных начальных радиусов, начальных объемных содержаний и разных теплофизических свойств газов в пузырьках фракций).

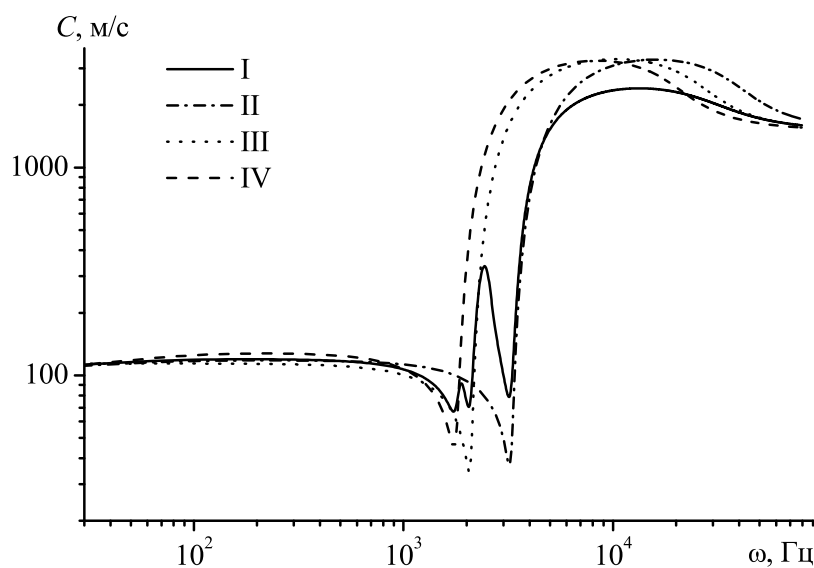


Рис. 1. Зависимость фазовой скорости от частоты для трехфракционной смеси воды с паровоздушными пузырьками, пузырьками углекислого газа с водяным паром и пузырьками гелия (I), монодисперсных смесей воды с паровоздушными пузырьками (II), пузырьками углекислого газа с водяным паром (III) и пузырьками гелия (IV)

3. Результаты

На рис. 1,2 представлено сравнение зависимостей фазовой скорости и коэффициента затухания от частоты возмущений для трехфракционной смеси воды с паровоздушными пузырьками, пузырьками углекислого газа с водяным паром и пузырьками гелия (I), монодисперсных смесей воды с паровоздушными пузырьками (II), пузырьками углекислого газа с водяным паром (III) и пузырьками гелия (IV). Расчетные зависимости построены с помощью дисперсионного соотношения (1) и при следующих значениях параметров смеси: $p_0 = 0.1$ МПа, $T_0 = 327$ К, кривые I построены для значений $\alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = 0.0033$, $a_{20} = 10^{-3}$ м, $a_{30} = 1.5 \cdot 10^{-3}$ м, $a_{40} = 2 \cdot 10^{-3}$ м, кривые II - $\alpha_2 = 0.01$, $a_0 = 10^{-3}$ м, кривые III - $\alpha_2 = 0.01$, $a_0 = 1.5 \cdot 10^{-3}$ м, кривые IV - $\alpha_2 = 0.01$, $a_0 = 2 \cdot 10^{-3}$ м.

Как видно из рисунков, учет трехфракционности состава дисперсной фазы смеси приводит к возникновению трех локальных минимумов и трех локальных максимумов для зависимостей фазовой скорости (рис. 1, I) и коэффициента затухания от частоты (рис. 2, I), в отличие от случая смеси жидкости с пузырьками одного радиуса (кривые II, III и IV). Это обусловлено различием значений резонансных частот собственных колебаний пузырьков каждой из фракций.

В низкочастотной, дорезонансной области заметно проявляется и различие газа в пузырьках. Так, при одинаковом общем объемном содержании пузырьков ($\alpha_2 = 0.01$), значение коэффициента затухания при распространении акустических волн в смеси воды с гелиевыми пузырьками будет больше, чем для смеси воды с только паровоздушными пузырьками (рис. 2, линии I и IV). Это связано с тем, что одним из параметров, определяющих интенсивность теплообмена при радиальных колебаниях пузырьков в волне, является температуропроводность газа.

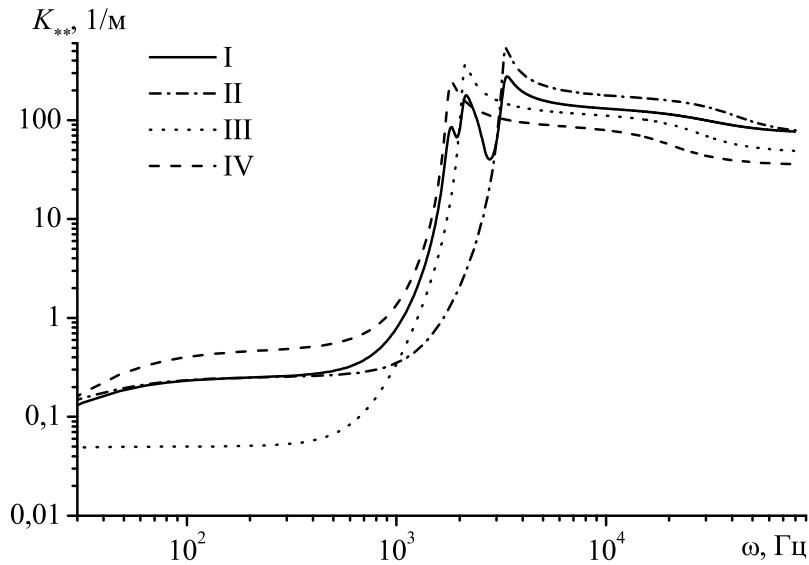


Рис. 2. Зависимость коэффициента затухания от частоты для трехфракционной смеси воды с паровоздушными пузырьками, пузырьками углекислого газа с водяным паром и пузырьками гелия (I), монодисперсных смесей воды с паровоздушными пузырьками (II), пузырьками углекислого газа с водяным паром (III) и пузырьками гелия (IV)

А значение коэффициента температуропроводности гелия в несколько раз больше по сравнению с воздухом.

4. Заключение

Изучено распространение акустических волн в многофракционных смесях жидкости с парогазовыми и газовыми пузырьками различных размеров с учетом фазовых превращений. В частности показано, что три фракции пузырьков различных радиусов являются причиной появления в непосредственной близости от резонансных частот собственных колебаний пузырьков трех минимальных значений фазовой скорости и характерного перегиба кривой фазовой скорости в этой области частот. Характерным является и три локальных максимума в зависимости коэффициента затухания от частоты в области значений резонансных частот парогазовых пузырьков.

Работа выполнена при финансовом содействии Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых и ведущих научных школ РФ (грант МК-2244.2014.1 и грант НШ-2669.2014.1) и при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-01-00135).

Summary

R.N. Gafiyatov. Propagation of acoustic waves in multi-fractional mixture of liquid with gas bubbles. The propagation of the acoustic waves in multifraction mixtures of liquid with vapor-gas and gas bubbles of different sizes and compositions with phase transformations has

been studied. A system of the differential equations of the motion of the mixture is presented, and the dispersion relation is deduced. It is shown that the dispersion and dissipation of the acoustic waves is significantly affected by different fractions of bubbles in the disperse phase.

Key words: linear waves, bubble liquid, interphase heat and mass transfer, dispersion relation

Литература

1. *Нигматуллин Р.И.* Динамика многофазных сред. Ч.1,2. – М.: Наука, 1987.
2. *Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г., Шрейбер И.Р.* Распространение волн в газо- и парожидкостных средах. – Новосибирск: ИТФ, 1983. – 238 с.
3. *Губайдуллин А.А., Ивандаев А.И., Нигматуллин Р.И., Хабеев Н.С.* Волны в жидкостях с пузырьками // В сб.: Итоги науки и техники, сер. МЖГ. ВИНТИ. – 1982. – Т. 17. – С. 160–249.
4. *Нигматуллин Р.И., Шагапов В.Ш., Вахитова Н.К.* Проявление сжимаемости несущей жидкости при распространении волн в пузырьковой среде // Докл. АН СССР. – 1989. – Т. 304, № 5. – С. 1077–1081.
5. *Азаматов А.Ш., Шагапов В.Ш.* Распространение малых возмущений в парогазожидкостной среде // Акустический журнал. – 1981. – Т. 27, № 2. – С. 161–169.
6. *Kerry W. Commander, Andrea Prosperetti* Linear pressure waves in bubbly liquids: Comparison between theory and experiments // J. of the Acoustical Society of America. – 1989. – V. 85, No 2. – P. 732.
7. *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.
8. *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.
9. *Губайдуллин Д.А., Никифоров А.А., Гафиятов Р.Н.* Распространение акустических волн в двухфракционных пузырьковых жидкостях с учетом фазовых превращений в каждой из фракций // Изв. РАН. МЖГ. – 2013. – № 3. – С. 92–99.
10. *Губайдуллин Д.А., Губайдуллина Д.Д., Федоров Ю.В.* Акустические волны в жидкостях с полидисперсными пузырьками газа. Сравнение теории с экспериментом // Изв. РАН. МЖГ. – 2013. – № 6. – С. 81–90.

Сведения о каждом из авторов статьи

Гафиятов Рамиль Накипович – к.ф.-м.н., научный сотрудник в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Института механики и машиностроения Казанского научного центра Российской академии наук

E-mail: gafiyatov@mail.ru