



ISSN: 2658–5782

Номер 1

2023

МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

mfs.uimech.org





Акустическая устойчивость перегретой жидкости с парогазовыми пузырьками

Сафиуллин А.Р.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа

Известно, что физико-химические свойства жидкостей в метастабильном состоянии в основном определяются наличием в их составе различных включений, например, газовых пузырьков или твердых частиц и установлено, что при механическом и тепловом равновесиях состояние жидкости с распределенными по объему газовыми пузырьками из-за действия капиллярных сил на межфазной поверхности всегда перегретое. В настоящей работе рассмотрено распространение слабых возмущений в перегретой водовоздушной пузырьковой среде, когда в пузырьках помимо пара воды присутствует инертный газ (например, воздух), не участвующий в фазовых переходах. Для описания рассматриваемых задач используется система уравнений, состоящая из законов сохранения массы, числа пузырьков, уравнений импульсов, уравнения Рэлея–Ламба, уравнения теплопроводности и диффузии. Решение ищется в виде затухающей бегущей волны. На основе решения дисперсионного уравнения построены карты зон устойчивости рассматриваемых систем в зависимости от величины перегретости жидкости на плоскости «объемное содержание – радиус пузырьков».

Ключевые слова: перегретая жидкость, пузырьки, фазовый переход, гармонические волны, фазовая скорость, коэффициент затухания

1. Введение

Из научной литературы известно, что физико-химические свойства жидкостей в метастабильном состоянии в основном определяются наличием в их составе различных включений, например, газовых пузырьков или твердых частиц [1]. В работе [2] получено критическое условие для радиуса пузырьков и их объемного содержания в зависимости от вида жидкости и значения давления жидкости, при этом парожидкостная система находится в состоянии устойчивого равновесия. Так как многофазные потоки (например, перегретые жидкости) часто встречаются в промышленности и химических производствах, вопрос безопасности данных производств встает особенно остро. Одной из причин возникновения чрезвычайных ситуаций может являться волновое воздействие на такие среды, поэтому анализ взаимодействия волн с границей

раздела и выявление закономерностей устойчивости многофазных потоков может способствовать повышению безопасности производства.

В настоящей работе рассмотрены особенности распространения звука и развития неустойчивости в перегретой жидкости, содержащей газы зародыши, в зависимости от степени ее перегрева, определяемой как $\Delta T_0 = T_0 - T_s(p_0)$.

2. Постановка задачи и основные уравнения

Пусть на плоскую границу раздела между «чистой» и газонасыщенной жидкостями падает плоская гармоническая волна. Будем полагать, как и в случае обычных однофазных сред, что отраженная от границы и преломленная волны являются плоскими гармоническими волнами [3]. В газонасыщенной жидкости, находящейся при температуре T_0 и давлении p_0 , имеются сферические пузырьки радиусом a_0 , которые содержат пар и нерастворимый в жидкой фазе газ. Рассмотрим двумерные

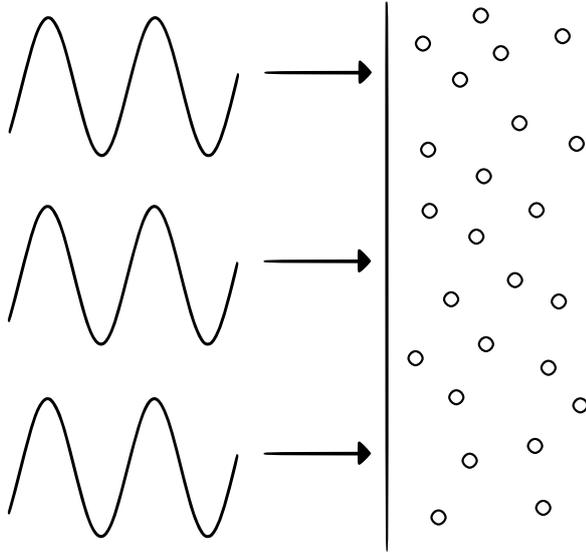


Рис. 1. Схема расчетной области

акустические волны. Ось Ox направим перпендикулярно к плоскости раздела между однофазной и двухфазной средами в сторону жидкости, а начало координат положим на границе раздела (рис. 1).

Для описания свойств акустических волн примем систему основных уравнений, состоящую из приведенного закона сохранения массы, числа пузырьков, уравнений импульсов, уравнения Рэлея–Ламба, уравнения теплопроводности и диффузии [4]:

$$\begin{aligned} \frac{1}{C_l^2} \frac{\partial p_l}{\partial t} + \rho_{l0}^0 \frac{\partial u}{\partial x} - 3\rho_{l0}^0 \frac{\alpha_0}{a_0} \frac{\partial a}{\partial t} &= 0, \\ \frac{dn}{dt} + n \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad \rho_{l0}^0 \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial p_l}{\partial x} &= 0, \\ \rho_{l0}^0 a_0 \frac{\partial^2 a}{\partial t^2} + 4 \frac{\rho_{l0}^0 \nu_l^{\text{II}}}{a_0} \frac{\partial a}{\partial t} = p_g - p_l + \frac{2\sigma}{a_0^2} a, \\ p_g &= p_v + p_a, \quad \alpha_0 = \frac{4}{3} \pi n_0 a_0^3, \end{aligned}$$

где индексы l, v, g относятся к параметрам жидкости, пара и газа, а нижний индекс «0» соответствует начальному состоянию; C_l — скорость звука в жидкости; p_l — давления в жидкости; t — время; ρ_{l0}^0 — истинные плотности жидкости; u — скорость среды; α_0 — начальные объемные содержания фаз; a — радиус пузырьков; n_0 — число пузырьков в единице объема; ν_l^{II} — кинематическая вязкость жидкости; p_g — давления в пузырьке; σ — коэффициент поверхностного натяжения.

Полная система уравнений, начальные и граничные условия подробно представлены в [5].

3. Дисперсионный анализ

Решение вышеприведенной системы уравнений будем искать в виде затухающей бегущей волны:

$$\begin{aligned} p_l, p_g, u, a &\sim e^{i(Kx - \omega t)}, \\ T_l' &= T_l(r) e^{i(Kx - \omega t)}, \quad T_g' = T_g(r) e^{i(Kx - \omega t)}, \\ k' &= k(r) e^{i(Kx - \omega t)}, \\ (K &= k + i\delta, \quad C_p = \omega/k, \quad i = \sqrt{-1}), \end{aligned}$$

где K — волновой вектор; δ — коэффициент затухания; C_p — фазовая скорость волны.

Возмущения, соответствующие падающей, отраженной и прошедшей волнам, снабдим верхними значками (0), (r) и (s). В рамках принятой модели пузырьковой жидкости вязкостные и теплообменные процессы учитываются лишь при межфазных взаимодействиях, смесь односкоростная, тензор напряжений — шаровой, поведение жидкости изотермическое, поэтому на границе $x = 0$, как и в случае однофазных сред, можно ограничиться двумя граничными условиями — непрерывности давления и нормальной компоненты скорости:

$$p^{(0)} + p^{(r)} = p^{(s)}, \quad u^{(0)} + u^{(r)} = u^{(s)}.$$

Здесь $u^{(0)}, u^{(r)}$ и $u^{(s)}$ — возмущения скорости, соответствующие плоским падающим, отраженным и прошедшим волнам. Тогда для падающей, отраженной и прошедшей волн можем записать:

$$\begin{aligned} p^{(0)} &= A_p^{(0)} \exp [i(K^{(0)} - \omega t)], \\ p^{(r)} &= A_p^{(r)} \exp [i(K^{(r)} - \omega t)], \\ p^{(s)} &= A_p^{(s)} \exp [i(K^{(s)} - \omega t)]. \end{aligned}$$

Для волновых чисел $K^{(0)}$ и $K^{(r)}$ имеет место $K^{(0)} = K^{(r)} = \omega/C_\ell$.

С учетом этого волновое число $K^{(s)}$ определяется из дисперсионного уравнения.

Из условия существования решения такого вида с учетом эффектов акустической разгрузки пузырьков [6] получим дисперсионное уравнение для пузырьковой жидкости:

$$\frac{K^2}{\omega^2} = \frac{(1 - \alpha_{g0})^2}{C_l^2} + 3 \frac{\rho_{l0}^0 \alpha_{g0} (1 - \alpha_{g0})}{\psi}.$$

Для этого уравнения вывод и основные обозначения представлены в [5].

Таблица 1. Теплофизические параметры, используемые в численных расчетах

Параметры	Синий	Оранжевый	Зеленый	Красный
p_0 , МПа	1.6	2.3	3.3	4.7
T_0 , К	473	493	513	533
$\nu_l \cdot 10^6$, м ² /с	0.158	0.148	0.141	0.135
ρ_{v0} , кг/м ³	7.862	11.62	16.76	23.72
ρ_{l0} , кг/м ³	863	840.3	813.6	784
c_{air} , Дж/кг·К	1025	1030	1035	1040
c_v , Дж/кг·К	3023	3408	3881	4468
c_l , Дж/кг·К	4505	4614	4766	4949
$\lambda_{air} \cdot 10^2$, м·кг/К·с ³	3.93	4.1	4.2	4.3
$\lambda_v \cdot 10^2$, м·кг/К·с ³	3.547	3.896	4.291	4.803
$\lambda_l \cdot 10^2$, м·кг/К·с ³	66.3	64.5	62.8	60.5
$L \cdot 10^{-3}$, Дж/кг	1945.7	1858.2	1759.7	1652.5
$\sigma \cdot 10^3$, Н/м	37.67	33.16	28.55	23.74

Для пузырьковой жидкости, описанной выше, в [7] определено условие для границы устойчивых и неустойчивых состояний:

$$\alpha_0 = \left(\frac{2}{3} \frac{\sigma}{p_{g0} a_0} - (1 - k_0) H_a \right) \frac{\beta}{k_0 \gamma'},$$

$$\beta = (\gamma - 1) \eta H_v \chi^2,$$

$$H_a = \frac{B_a}{B_{g0}}, \quad H_v = \frac{B_v}{B_{g0}}, \quad \eta = \frac{\rho_{l0}^0 c_l}{\rho_{g0}^0 c_g}, \quad \chi = \frac{c_g T_0}{L},$$

где k_0 — массовая доля пара в пузырьках; γ — показатель адиабаты для газа; B_a , B_v и B_{g0} — приведенные газовые постоянные для газа, пара и всего пузырька; c_l и c_g — теплоемкость воды и пузырька; L — удельная теплота парообразования; T_0 — начальная температура в среде.

В случае отсутствия газа в пузырьках получим [7]:

$$\alpha_0 = \frac{2}{3} \frac{\sigma}{\rho_{l0}^0 a_0 C_L^2}, \quad C_L = \frac{\rho_{g0}^0 L}{\rho_{l0}^0 \sqrt{c_l T_0}},$$

где C_L — скорость звука Ландау [8].

4. Результаты численных расчетов

На основе представленных уравнений были выполнены численные расчеты, которые проводились при теплофизических параметрах представленных в табл. 1.

Здесь также принималась скорость звука в воде $C_l = 1500$ м/с. Остальные необходимые параметры вычисляются.

На рис. 2 представлена карта зон устойчивости для четырех различных начальных давлений в

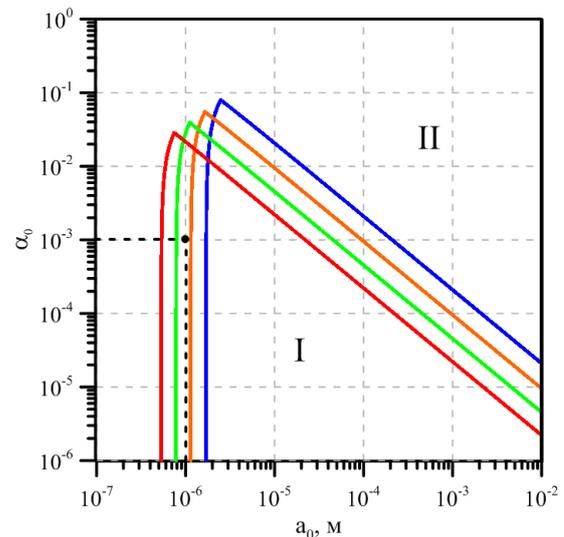


Рис. 2. Карта зон устойчивости в зависимости от начального давления в смеси: синий цвет — 1.6 МПа; оранжевый — 2.3 МПа; зеленый — 3.3 МПа и красный — 4.7 МПа

среде. Синим цветом показаны результаты для начального давления 1.6 МПа; оранжевым — 2.3 МПа; зеленым — 3.3 МПа и красным — 4.7 МПа. Начальное объемное содержание пузырьков в расчетах бралось равным $\alpha_0 = 10^{-3}$ (такое же для рис. 3) и начальная перегретость смеси равна $\Delta T_0 = 1$ К. На представленном рисунке левая граница (возрастающая линия) отвечает за пузырьковую смесь с увеличивающимся паросодержанием. Правая граница (убывающая линия) отвечает за смесь с паросодержанием равным единице. Внутренняя часть (обозначенная на рисунке римской буквой I) соответствует неустойчивому состоянию, а внешняя (обозначенная на рисунке римской буквой II) — устой-

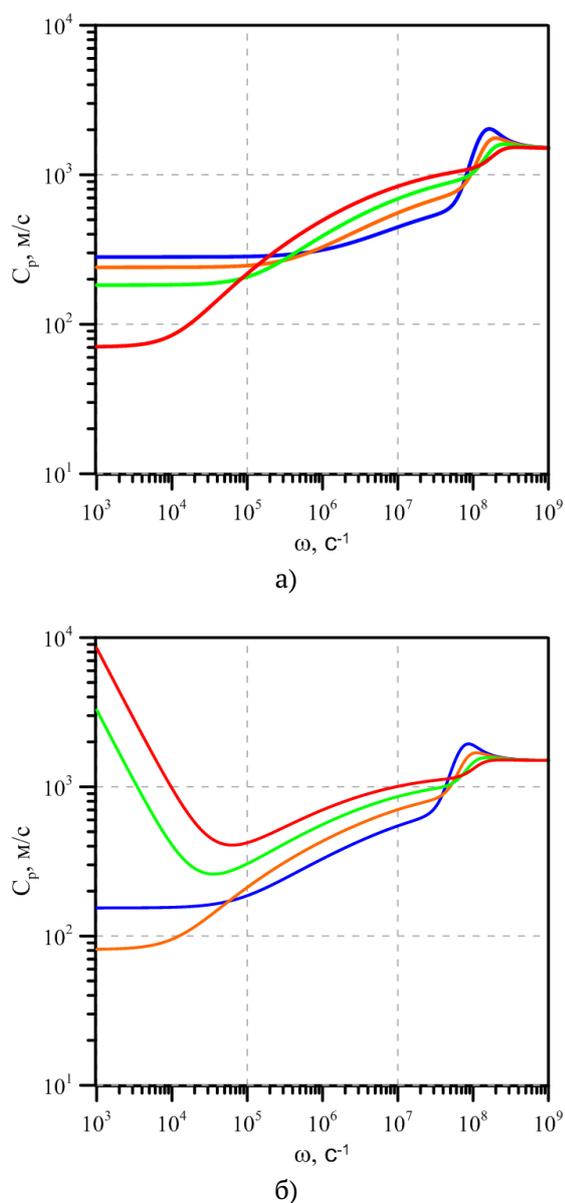


Рис. 3. Зависимость фазовой скорости от частоты возмущений для двух значений начального радиуса пузырьков: $a_0 = 5 \cdot 10^{-7}$ м (а) и $a_0 = 10^{-6}$ м (б)

чивому состоянию. Видно, что с ростом начального давления граница зоны устойчивости смещается левее и опускается ниже, тем самым увеличивая зону устойчивости.

На рис. 3 показаны зависимости фазовой скорости от частоты возмущений для двух начальных значений радиуса пузырьков. Верхний график представлен для радиуса пузырька равного $a_0 = 5 \cdot 10^{-7}$ м, а нижний — для $a_0 = 10^{-6}$ м. Из рис. 3 видно, что радиус $a_0 = 5 \cdot 10^{-7}$ м попадает в зону устойчивости для всех рассмотренных че-

тырех начальных давлений, а радиус $a_0 = 10^{-6}$ м только для двух: 1.6 МПа и 2.3 МПа. На нижнем графике рис. 3 видно, что для радиуса $a_0 = 10^{-6}$ м кривые для указанных выше давлений ведут себя немонотонно в низкочастотной области. Для радиуса $a_0 = 5 \cdot 10^{-7}$ м получаем гладкие графики для фазовой скорости, которые в предельном случае подтверждают ранее полученные результаты других авторов.

Результаты, полученные в настоящей работе, являются продолжением исследований из [7].

5. Заключение

На основе аналитических и численных расчетов построена карта зон устойчивости пузырьковой парогазожидкостной смеси в зависимости от величины начального давления в смеси. Установлено, что увеличение начального давления смеси приводит к росту зоны устойчивости. Согласно полученной карте показано, что для параметров смеси, не соответствующих зоне устойчивости, фазовая скорость имеет вид немонотонной функции в низкочастотной области.

Список литературы

- [1] Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Т. 1, 2. М.: Наука, 1987. 360 с., 464 с.
- [2] Вахитова Н.К., Шагапов В.Ш. О распространении малых возмущений в парожидкостных пузырьковых средах // Прикладная механика и техническая физика. 1984. № 5. С. 34–43. <https://sibran.ru/upload/iblock/71a/71a1de7a615a2b166abb82f311fe4a3c.pdf>
- [3] Исакович М.А. Общая акустика. М.: Наука, 1973. 502 с.
- [4] Шагапов В.Ш., Галимзянов М.Н., Вдовенко И.И. Акустика и устойчивость перегретой жидкости с газовыми зародышами // Прикладная механика и техническая физика. 2019. Т. 60, № 3. С. 85–95. DOI: 10.15372/PMTF20190309
- [5] Шагапов В.Ш., Галимзянов М.Н., Вдовенко И.И., Хабеев Н.С. Особенности распространения звука в теплой воде с воздушными пузырьками // Инженерно-физический журнал. 2018. Т. 91, № 4. С. 912–921. EDN: XUKXWN
- [6] Нигматулин Р.И., Шагапов В.Ш., Вахитова Н.К. Проявление сжимаемости несущей фазы при распространении волны в пузырьковой среде // Докл. АН СССР. 1989. Т. 304, № 5. С. 1077–1081. MathNet: dan48504
- [7] Шагапов В.Ш., Галимзянов М.Н., Вдовенко И.И. Особенности устойчивости и акустических свойств перегретой жидкости с газовыми зародышами при повышении давления // Теплофизика высоких температур. 2019. Т. 57, № 5. С. 748–754. DOI: 10.1134/S0040364419050144
- [8] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Физматлит, 2006. 736 с.



Acoustic stability of a superheated liquid with vapor-gas bubbles

Safullin A.R.

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

It is known that the physicochemical properties of liquids in a metastable state are mainly determined by the presence of various inclusions in their composition, for example, gas bubbles or solid particles, and it has been established that, under mechanical and thermal equilibrium, the state of a liquid with gas bubbles distributed over the volume due to the action of capillary forces at the interface, always overheated. In this paper, we consider the propagation of weak perturbations in a superheated water-air bubbly medium, when, in addition to water vapor, the bubbles contain an inert gas (for example, air) that does not participate in phase transitions. To describe the problems under consideration, a system of equations is used, which consists of the laws of conservation of mass, the number of bubbles, momentum equations, the Rayleigh–Lamb equation, the equation of heat conduction and diffusion. The solution is sought in the form of a damped traveling wave. Based on the solution of the dispersion equation, maps of the stability zones of the systems under consideration were constructed depending on the magnitude of the liquid overheating on the plane "volume content – bubble radius".

Keywords: superheated liquid, bubbles, phase transition, harmonic waves, phase velocity, damping factor

References

- [1] Nigmatulin R.I. Dynamics of Multiphase Media. New York: Hemisphere, 1991. Vols. 1 and 2. P. 360 and P. 464.
- [2] Shagapov V.Sh., Vakhitova N.K. Propagation of Small Perturbations in Vapor-and-Liquid Bubbling Media // *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 1984. V. 25. Pp. 682–691.
DOI: 10.1007/BF00909368
- [3] Isakovich M.A. *Obshchaya akustika [General Acoustics]*, Moscow: Nauka, 1973. P. 502.
- [4] Shagapov V.Sh., Galimzyanov M.N., Vdovenko I.I. Acoustics and Stability of an Overheated Liquid with Gas Bubbles // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics.* 2019. V. 60, No. 3. P. 473–482.
DOI: 10.1134/S002189441903009X
- [5] Shagapov V.Sh., Galimzyanov M.N., Vdovenko I.I., Khabeev N.S. Realization of high pressures and temperatures in the gas phase of a bubble liquid flowing through a nozzle // *Journal of engineering physics and thermophysics.* 2018. V. 91, No. 4. P. 1206–1209.
DOI: 10.1007/s10891-007-0155-0
- [6] Nigmatulin R.I., Shagapov V.Sh., Vakhitova N.K. Manifestation of the Carrying Phase Compressibility During Propagation of a Wave in a Bubble Medium // *Doklady Akademii Nauk*, 1989. V. 304, No. 5. P. 1077–1081.
MathNet: dan48504
- [7] Shagapov V.Sh., Galimzyanov M.N., Vdovenko I.I. Characteristics of the stability and acoustic properties of superheated liquid with gas nuclei under increasing pressure // *High temperature.* 2019. V. 57, No. 5. P. 712–717.
DOI: 10.1134/S0018151X19050146
- [8] Landau L.D., Lifshitz E.M. *Gidrodinamika [Hydrodynamics]*. Moscow, Fizmatlit, 2006. P. 736.