

Акустика вязкоупругой жидкости с покрытыми оболочкой пузырьками¹

Федоров Ю.В.

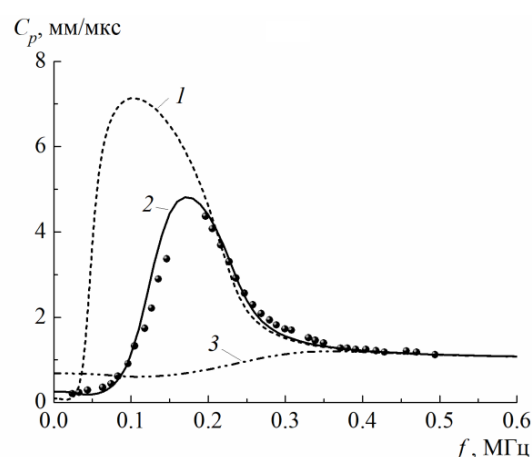
Институт механики и машиностроения ФИЦ КазНЦ РАН, Казань

Покрытые вязкоупругой оболочкой пузырьки встречаются во многих областях. Но основное применение они нашли в биомедицине, где используются в качестве контрастных веществ для ультразвуковой диагностики [1, 2].

В рамках данной работы получено модифицированное уравнение Релея-Ламба, учитывающее радиальные колебания пузырька газа, покрытого вязкоупругой оболочкой и находящегося в вязкоупругой среде. Для случая малых возмущений найдено дисперсионное уравнение, учитывающее межфазный теплообмен между газом, вязкоупругой оболочкой и несущей средой. Выписано аналитическое выражение равновесной скорости звука и установлена ее зависимость от размера вязкоупругой оболочки и частоты возмущений. Показано влияние зависимостей модуля сдвига и вязкости бутиловой резины от частоты возмущений при различной температуре на кривые фазовой скорости и коэффициента затухания. Проиллюстрировано влияние оболочки пузырьков, упругости несущей фазы на динамику акустических волн.

В частности, на приведенном рисунке представлено влияние упругости несущей среды, оболочки пузырьков на зависимости фазовой скорости от частоты возмущений для смеси полидиметилсилоксана (PDMS RTV-615) с воздушными пузырьками. Дано сравнение теории с экспериментальными данными [3]. Кривая 1 построена без учета упругости несущей среды, кривая 2 – с учетом упругости несущей среды, кривая 3 – с учетом упругости несущей среды и при наличии вязкоупругой оболочки пузырьков. Как видно из рисунка, учет упругости несущей фазы приводит к сдвигу резонансной частоты возмущений (кривая 2), что также хорошо подтверждается экспериментальными данными. Дополнительный учет вязкоупругой оболочки приводит к еще большему значению резонансной частоты (кривая 3). Наличие оболочки пузырьков может привести также к

исчезновению полосы непрозрачности у фазовой скорости (фазовая скорость не превысит скорость звука в несущей фазе во всем диапазоне частот). Это связано с тем, что оболочка пузырьков сдерживает пульсации включений.



Пузырьки ведут себя как упругие частицы и, в связи с этим, происходит меньшее рассеяние акустической волны по сравнению с обычными пузырьковыми средами.

Список литературы:

- [1] Goldberg B.B., Raichlen J.S., Editors F.F. Ultrasound contrast agents. Basic principles and clinical applications. Martin Dunitz, 2001.
- [2] Sboros V. Response of contrast agents to ultrasound // Advanced Drug Delivery Reviews. 2008. V. 60. P. 1117-1136.
- [3] Leroy V., Strybulevich A., Page J.H., Scanlon M. G. Influence of positional correlations on the propagation of waves in a complex medium with polydisperse resonant scatterers // Physical Review E. 2011. V. 83. P. 046605.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ (МК-297.2020.1) и гранта РФФИ (19-01-00442 А).