

УДК 532.529:534.2

АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ В СМЕСИ ВОЗДУХА С ПОЛИДИСПЕРСНЫМИ ЧАСТИЦАМИ АЛЮМИНИЯ

© 2024 г. Д. А. Губайдуллин*, Р. Р. Зарипов**

*Институт механики и машиностроения – ОСП ФГБУН “Федеральный исследовательский
центр “Казанский научный центр РАН”, Казань, Россия*

**E-mail: gubaidullin@imm.knc.ru*

***E-mail: rinat_zaripov.imm@mail.ru*

Поступило в редакцию 06.06.2023 г.

После доработки 25.10.2023 г.

Принято к публикации 04.12.2023 г.

На основе ранее разработанной линейной теории по распространению и затуханию акустических волн в полидисперсных газовзвесьях проведено сравнение теоретических и экспериментальных данных. Построены зависимости декремента затухания на длине волны от частоты возмущения для смеси воздуха с полидисперсными частицами алюминия. Показано, что применение полидисперсной модели в газовзвесьях дает более точное описание эксперимента, чем использование монодисперсной модели.

DOI: 10.31857/S0040364424010175

ВВЕДЕНИЕ

Понимание особенностей распространения акустических волн в многофазных средах важно во многих областях. Акустические методы могут использоваться для мониторинга и определения характеристик многофазных сред в технологических процессах, атомной энергетике, химической, нефтехимической и агрохимической промышленности. Частицы могут влиять на (нелинейную) акустику в камерах сгорания, таких как ракетные двигатели с металлизированным топливом и усилители тяги реактивных двигателей [1]. Метеорологов интересует распространение звука в облаках и тумане, а также загрязнение воздуха. Учет эффектов звукового распространения в облаках и тумане является важным для улучшения прогнозов погоды и исследования климата. Наличие в воздухе примесей в виде жидких и твердых включений приводит к изменению акустических характеристик среды. В них распространение акустических волн становится более сложным процессом. Основы динамики многофазных сред представлены в работах [2–4]. Некоторые экспериментальные и теоретические исследования характеристик двухфазных сред с твердыми частицами и каплями рассмотрены в [5–10]. Исследования, посвященные особенностям распространения и затухания акустических волн в многофракционных смесях, описаны в [11, 12].

В настоящей работе выполнено сопоставление теоретических результатов с экспериментальными и теоретическими данными других авторов по затуханию звука в смеси воздуха с частицами алюминия разных размеров.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе [13] представлены экспериментальные данные по затуханию звука в смеси воздуха с частицами алюминия. Диапазон частот изменялся в пределах 200–2000 Гц. Объемное содержание частиц алюминия составляло $\alpha = 10^{-6}$. Радиус частиц алюминия изменялся в диапазоне 1–6 мкм. Зависимость суммарного распределения частиц по объему в процентах от радиуса частиц R в микрометрах представлена на рис. 1 [13].

Полученные из рис. 1 значения радиусов R частиц алюминия и их доли p от объемного содержания α представлены в таблице.

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Сравнение экспериментальных данных проводится с помощью дисперсионного соотношения, которое было получено в работе [12]. Данное соотношение описывает распространение и затухание акустических волн в многофракционных полидисперсных газовзвесьях. Так как в эксперименте рассматривается одна полидисперсная

Размеры частиц алюминия и их доля от объемного содержания

R , мкм	1	1.507	1.751	1.998	2.201	2.348	2.5	2.693
p	0.0095	0.017	0.019	0.0254	0.0499	0.0415	0.0596	0.0819
R , мкм	2.8446	2.9998	3.0979	3.1993	3.3902	3.4956	3.581	3.6983
p	0.05	0.1022	0.049	0.0521	0.099	0.0298	0.0468	0.0426
R , мкм	3.8875	3.9762	4.1867	4.373	4.5751	4.9755	5.4638	6
p	0.0788	0.038	0.034	0.027	0.0213	0.014	0.0074	0.0065

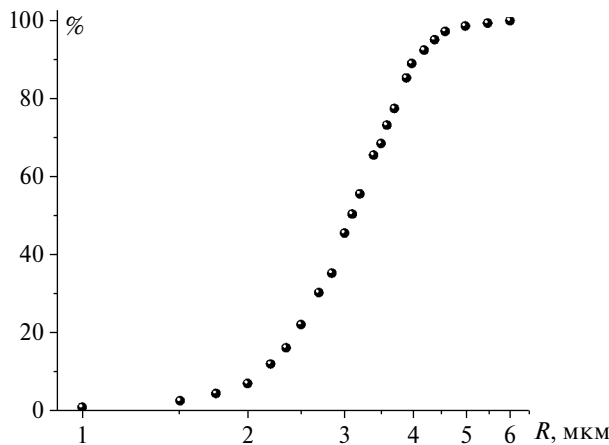


Рис. 1. Суммарное распределение частиц алюминия по объему в зависимости от радиуса частиц R .

фракция (частицы алюминия), то, полагая $j = 1$ в дисперсионном соотношении [12], получаем следующее дисперсионное соотношение:

$$\left(\frac{C_1 K_*}{\omega} \right)^2 = V(\omega) D(\omega), \quad (1)$$

$$V(\omega) = 1 + m \left\langle \frac{1}{1 - i\omega\tau_v^*} \right\rangle,$$

$$D(\omega) = 1 + (\gamma_1 - 1) \frac{D_0(\omega)}{1 + D_0(\omega)},$$

$$D_0(\omega) = m \frac{c_{p2}}{c_{p1}} \left\langle \frac{1}{1 - i\omega\tau_T^*} \right\rangle,$$

$$\langle h \rangle = \frac{\int_{R_{\min}}^{R_{\max}} N(R) g(R) h dR}{\int_{R_{\min}}^{R_{\max}} N(R) g(R) dR},$$

$$\tau_v^* = \frac{2 \rho_2 R_2^2}{9 \mu_1} \left(1 - \frac{1-i}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega \frac{\rho_1 R_2^2}{\mu_1}} \right)^{-1},$$

$$\tau_T^* = \tau_{\lambda 2} \frac{3z_2 - (3 + z_2^2)th(z_2)}{3z_2^2(th(z_2) - z_2)} + m \frac{c_{p2}}{3c_{p1}} \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \frac{\tau_{\lambda 1}}{1 + z_1},$$

$$z_1 = (1 - i) \sqrt{\frac{\omega \tau_{\lambda 1}}{2}}, \quad z_2 = (1 - i) \sqrt{\frac{\omega \tau_{\lambda 2}}{2}},$$

$$\tau_{\lambda 1} = \frac{R_2^2 \rho_1 c_{p1}}{\lambda_1}, \quad \tau_{\lambda 2} = \frac{R_2^2 \rho_2 c_{p2}}{\lambda_2}.$$

Здесь C — скорость звука; K_* — комплексное волновое число; ω — круговая частота возмущений; m — массовое содержание; i — мнимая единица; τ_v^* — комплексное время релаксации скоростей фаз при квазистационарном обтекании частиц газом [3]; γ — показатель адиабаты; c_p — теплоемкость; τ_T^* — комплексное время релаксации температуры [3]; $R_{\max}$, $R_{\min}$ — максимальный и минимальный радиусы частицы; $N(R)$ — функция распределения частиц по размерам; $g(R)$ — масса одной частицы; $\langle h \rangle$ — линейный оператор осреднения [3]; μ_1 — коэффициент динамической вязкости; λ — коэффициент теплопроводности. Нижний индекс 1 относится к несущей фазе (воздух), индекс 2 — к дисперсной фазе (частицы алюминия). Функции $V(\omega)$ и $D(\omega)$ описывают эффекты, связанные с межфазным трением и межфазным теплообменом соответственно.

Отметим, что дисперсионное соотношение (1) описывает распространение и затухание акустических волн в смеси газа с полидисперсной твердой фракцией с учетом произвольной функции распределения частиц по размерам. Из данного дисперсионного соотношения можно получить выражение для декремента затухания на длине волны [3]:

$$\sigma = \frac{2\pi K_{**}}{K}, \quad K_* = K + iK_{**}. \quad (2)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Расчеты проведены с помощью дисперсионного соотношения (1) и уравнения (2). Теплофизические свойства воздуха и частиц алюминия при температуре $T_0 = 237$ К и давлении $p_0 = 0.1$ МПа взяты из справочника [14]. В качестве функции

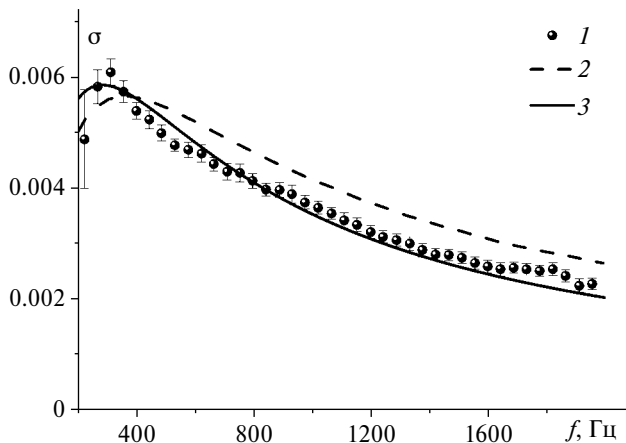


Рис. 2. Сопоставление данных теории и эксперимента по декременту затухания на длине волны в смеси воздуха с полидисперсными частицами алюминия: 1 – экспериментальные данные [13]; 2 – теоретические данные [15]; 3 – результаты, полученные с помощью (1).

распределения частиц по размерам выбрана функция с нормальным распределением, которая имеет следующий вид:

$$N(R) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{R-R_0}{s}\right)^2}, \quad R_{\min} < R < R_{\max}, \quad (3)$$

где R_0 – среднее значение, s – среднеквадратическое отклонение. Данные параметры определены из таблицы и составляют $R_0 = 3.17$ мкм и $s = 0.77$ мкм.

На рис. 2 приведены зависимости декремента затухания на длине волны σ от частоты возмущений $f = \omega/(2\pi)$ для смеси воздуха с полидисперсными частицами алюминия. Теоретические данные построены по монодисперсной модели со средним радиусом $R_0 = 3.2$ мкм [15]. Теоретические результаты настоящей работы получены с помощью (1) в рамках полидисперсной модели с учетом функции распределения частиц по размерам (3). При учете полидисперсного состава смеси наблюдается хорошее соответствие теоретической кривой экспериментальным значениям. Таким образом, учет функции распределения частиц по размерам в рамках полидисперсной теории дает более качественное описание эксперимента по сравнению с монодисперсной теорией, которая учитывает только средний размер частиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере смеси воздуха с частицами алюминия представлено сравнение ранее разработанной континуальной теории с экспериментальными данными по затуханию акустических волн. По имеющимся экспериментальным данным подобрана

функция распределения частиц по размерам, учитывающая полидисперсность смеси. Выявлено, что теория, разработанная в рамках полидисперсной модели, более точно описывает проведенный эксперимент по сравнению с монодисперсной теорией.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-11-20070 (<https://rscf.ru/project/20-11-20070/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Culick F.E.C.* Some Recent Result for Nonlinear Acoustics in Combustion Chambers // *AIAA J.* 1994. V. 32. P. 146.
2. *Нигматуллин Р.И.* Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987. 464 с.
3. *Губайдуллин Д.А.* Динамика двухфазных парогазо-капельных сред. Казань: Изд-во Казанск. матем. общ-ва, 1998. 154 с.
4. *Temkin S.* Suspension Acoustics: An Introduction to the Physics of Suspensions. N.Y.: Cambridge Univ. Press, 2005. 418 p.
5. *Marble F.E.* Dynamics of Dusty Gases // *Ann. Rev. Fluid Mech.* 1970. V. 2. P. 397.
6. *Вараксин А.Ю.* Обтекание тел дисперсными газовыми потоками // *ТВТ.* 2018. Т. 56. № 2. С. 282.
7. *Губайдуллин Д.А., Федоров Ю.В.* Сферические и цилиндрические волны в парогазовых смесях с полидисперсными частицами и каплями // *ТВТ.* 2012. Т. 50. № 5. С. 659.
8. *Temkin S., Dobbins R.A.* Measurements of Attenuation and Dispersion of Sound by an Aerosol // *J. Acoust. Soc. Am.* 1966. V. 40. P. 1016.
9. *Вараксин А.Ю.* Столкновения частиц и капель в турбулентных двухфазных потоках // *ТВТ.* 2019. Т. 57. № 4. С. 588.
10. *Вараксин А.Ю., Мочалов А.А., Желебовский А.А.* Характеристики течения в следе за крупной движущейся частицей // *ТВТ.* 2022. Т. 60. № 2. С. 701.
11. *Губайдуллин Д.А., Терегулова Е.А., Губайдуллина Д.Д.* Распространение акустических волн в многофракционных газовзвесах // *ТВТ.* 2015. Т. 53. № 5. С. 752.
12. *Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Р.* Акустические волны в многофракционных газовзвесах с полидисперсными включениями // *ТВТ.* 2019. Т. 57. № 3. С. 475.
13. *Moss S.* Acoustic Measurements of Flowing and Quasi-static Particulate Suspensions. PhD dis., 1997. P. 339.
14. *Варгафтик Н.Б.* Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 721 с.
15. *Lloyd P., Berry M.V.* Wave Propagation Through an Assembly of Spheres // *Proc. Phys. Soc.* 1967. V. 91. P. 678.