

# Слабые волны в парогазовых смесях с полидисперсными каплями и частицами<sup>1</sup>

Федоров Ю.В.

Институт механики и машиностроения Казанского научного центра РАН, Казань

Изучено распространение плоских, сферических и цилиндрических волн в парогазовых смесях с полидисперсными частицами и каплями, когда одна из фракций участвует в фазовых превращениях. Получено дисперсионное соотношение, рассчитаны дисперсионные кривые. Проанализировано влияние полидисперсности частиц и капель на дисперсию и диссипацию малых возмущений.

## 1. Введение

Проблема исследования нестационарных волновых процессов в многофазных системах с учетом неравновесных эффектов межфазного взаимодействия является одной из актуальных и фундаментальных проблем механики сплошных сред. Примерами многофазных (гетерогенных) систем могут служить различные смеси газа с каплями или частицами, жидкости с пузырьками газа, насыщенные жидкостью или газом пористые среды и многие другие. Из многочисленного разнообразия гетерогенных сред могут быть выделены дисперсные смеси, имеющие сравнительно регулярный характер и представляющие смесь двух фаз, одной из которых являются различные включения (частицы, капли или пузырьки). Исследование нестационарных волновых процессов в таких системах обычно осложняется необходимостью учета полидисперсного состава (неодинаковости размеров включений), поскольку в реальности маловероятно встретить с включениями одинакового размера. При описании движения таких систем следует учитывать реальное распределение диспергированных включений по размерам, а также межфазный обмен массой, импульсом и теплом. Настоящая работа учитывает все эти нестационарные и неравновесные эффекты. Для обзора приведены некоторые работы по данной тематике [1–6].

## 2. Некоторые результаты

В процессе описания возмущенного движения парогазовой смеси с полидисперсными каплями и частицами записывается линеаризованная система из 16 уравнений. В ходе решения получают довольно громоздкие выражения, поэтому ограничимся лишь приведением некоторых результатов.

На рис. 1, 2 проиллюстрировано влияние полидисперсности капель воды и частиц золы на вид зависимостей относительной скорости звука и декремента затухания на длине волны от безразмерной частоты колебаний  $\Omega_{5,3}$  ( $\Omega_{5,3} = \omega \tau_{va}^{(5,3)}$ , где  $\omega$  — частота колебаний;  $\tau_{va}^{(5,3)}$  — характерное время релаксации скорости дисперсной фазы;  $a_{5,3}$  — средний радиус [3]). Переменные с индексом  $a$  соответствуют каплям воды радиуса  $a$ , с индексом  $b$  — частицам золы радиуса  $b$ . При расчетах принималось, что относительное массовое содержание капель воды  $m_a = 0.3$ ; частиц золы  $m_b = 0.3$ ; давление несущей фазы  $p_1 = 0.1$  МПа ( $T_0 = 271$  К); концентрация пара  $k_V = 0.006$ . Функции распределения капель и частиц по размерам соответственно равны:  $N_0(a) = a^{-3}$ ,  $N_0(b) = b^{-3}$ . Радиусы капель воды и частиц золы были заданы следующим образом:  $1 - a = 10^{-4}$ ,  $b = 10^{-6}$ ,  $2 - a = 10^{-5}$ ,  $b = 10^{-7}$ ,  $a \in [10^{-5}, 10^{-4}]$ ,  $b \in [10^{-7}, 10^{-6}]$ . Можно заключить, что в полидисперсном случае капель и частиц 3 с выбранными выше функциями распределения по размерам, затухание меньше по сравнению с монодисперсными случаями 1 и 2.

В частном случае парогазокапельной смеси без частиц ( $m_b = 0$ ) имеются экспериментальные данные по декременту затухания на длине волны [7]. Эксперимент проводился в камере Вильсона. Измерение размеров и концентрации капель проводи-

<sup>1</sup>Работа выполнена при финансовом содействии Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых и ведущих научных школ РФ (МК-1316.2010.1 и НШ-834.2012.1) по программе Президиума РАН №23П, при финансовой поддержке РФФИ (грант 10-01-00098) и Министерства образования и науки РФ (14.740.11.0351).

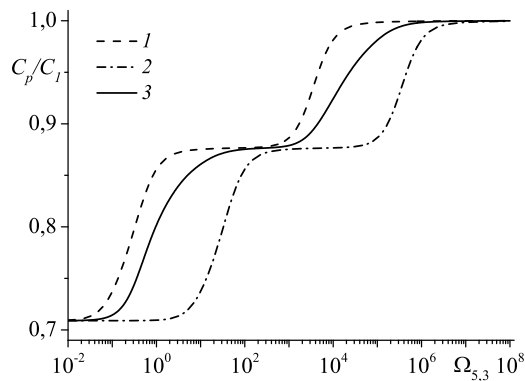


Рис. 1. Зависимости относительной скорости звука от безразмерной частоты колебаний

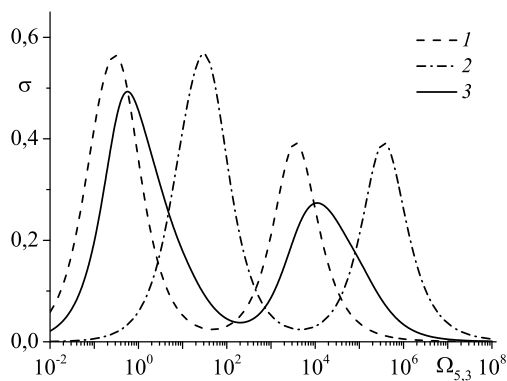


Рис. 2. Зависимости декремента затухания от безразмерной частоты колебаний

лось оптическими методами. Опыты проводились при массовом содержании капель  $m_a \sim 10^{-3}$ , частота колебаний составляла 80 Гц, радиус капель варьировался от  $10^{-6}$  до  $10^{-5}$  м. Три группы экспериментальных точек соответствуют трем экспериментам, проведенным при различных массовых содержаниях капель, а также различной температуре (разной концентрации пара в газообразной фазе):

- 1 —  $T_0 = 281$  К,  $m_a = 0.0076$ ,  $k_V = 0.012$ ;
- 2 —  $T_0 = 276$  К,  $m_a = 0.0039$ ,  $k_V = 0.008$ ;
- 3 —  $T_0 = 271$  К,  $m_a = 0.0038$ ,  $k_V = 0.006$ .

Отметим, что из-за сложности эксперимента следует большой разброс опытных данных  $\sim 10$ –15%. На рис. 3  $\omega\tau$  — безразмерная частота коле-

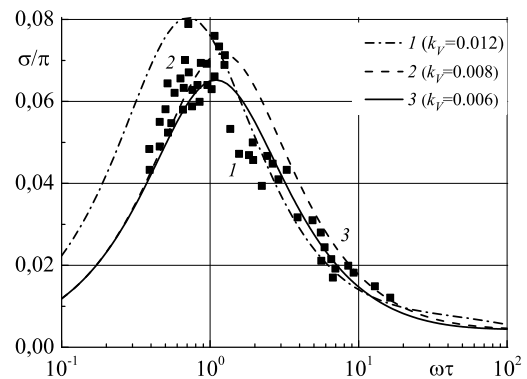


Рис. 3. Сопоставление теории с экспериментальными данными по декременту затухания

баний, где  $\tau = \frac{3\tau_{va}^{(3,1)}}{2m_a}$ . В целом наблюдается удовлетворительное согласие теории и эксперимента. Наиболее важным параметром, влияющим на положение кривых, является концентрация пара  $k_V$  в несущей фазе. Точное определение значения  $k_V$  в экспериментах связано с большими трудностями, поэтому при его определении авторы экспериментов полагали, что начальное состояние является состоянием термодинамического равновесия, то есть  $k_V = k_{VS}(T_0)$ . Быть может по этой причине в некоторых случаях декремент затухания при одних значениях концентрации пара совпадает с экспериментальными данными, полученными при других значениях  $k_V$ .

К сожалению, для проверки теории в общем случае пока нет соответствующих экспериментальных данных.

### 3. Заключение

Полидисперсность включений оказывает существенное влияние на динамику распространения малых возмущений.

### Список литературы

- [1] Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч.1, Ч.2. М.: Наука, 1987.
- [2] Temkin S., Dobbins R.A. Measurements of attenuation and dispersion of sound by an aerosol // J. Acoust. Soc. America. 1966. V. 40, № 5. P. 1016.
- [3] Губайдуллин Д.А. Динамика двухфазных парогазо-капельных сред. Казань: Изд-во Казанского математического общества, 1998.

- 
- [4] Gubaidullin D.A., Nigmatulin R.I. On theory of acoustic waves in polydispersed gas-vapor-droplets suspensions // *Int. J. Multiphase Flow*. 1998. V. 58 P. 230.
- [5] Губайдуллин Д.А. Сферические и цилиндрические волны малой амплитуды в полидисперсных туманах с фазовыми превращениями // *Изв. РАН. МЖГ*. 2003. № 5. С. 85.
- [6] 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 // *Изв. РАН. МЖГ*. 2011. № 1. С. 83.
- [7] Cole J.E., Dobbins R.A. Measurements of attenuation and dispersion of sound by a warm air fog // *J. Atm. Sci.* 1971. V. 28, № 2. P. 202.