ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР, 2022, том 60, № 1, с. 146–148

УДК 532.529: 534.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСАЖДЕНИЯ АЭРОЗОЛЯ В ЗАКРЫТОЙ ТРУБЕ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ СЕЧЕНИЕМ

© 2022 г. Д. А. Губайдуллин*, Р. Г. Зарипов**, Л. А. Ткаченко***, Л. Р. Шайдуллин****

Институт механики и машиностроения – обособленное структурное подразделение ФИЦ КазНЦ РАН, г. Казань, Россия

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

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

****E-mail: luda_tkachenko@inbox.ru*

*****E-mail: liqn@mail.ru*

Поступило в редакцию 30.03.2021 г.
После доработки 25.10.2021 г.
Принято к публикации 23.11.2021 г.

Исследованы нелинейные колебания вблизи резонансной частоты аэрозоля в закрытой трубе с изменяющимся сечением. Представлены зависимости размаха колебаний давления среды от числа Рейнольдса. Выявлено, что при резонансе уменьшение концентрации аэрозоля в трубе со временем происходит в 12 раз быстрее, чем в отсутствие колебаний. Дается сравнение результатов с экспериментальными данными для однородных труб.

DOI: 10.31857/S0040364422010057

ВВЕДЕНИЕ

Современные технические устройства, применяемые во многих областях промышленности, имеют различные размеры и сложную геометрию. Проходящие в них технологические процессы имеют “волновую природу” и сопровождаются различными нелинейными эффектами: ударными волнами, вихревыми движениями, фокусировкой дисперсной фазы [1]. Нелинейные колебания в акустике подробно рассмотрены в [2, 3], динамика многофазных сред при волновом воздействии – в [4]. Для интенсификации нелинейных колебаний газа может быть использована система, содержащая трубу переменного сечения, например конусную, или с резким переходом [5, 6]. Численные исследования колебаний газа в резонаторах цилиндрической формы с медленно изменяющимся сечением показали, что также происходит искажение формы волны и сдвиг резонансной частоты [7]. Интенсивное воздействие волнового поля на однородные и многофазные среды при достаточно слабых возмущениях в ограниченных объемах позволяет решать актуальную задачу акустической коагуляции и осаждения аэрозолей [8], в частности, в обрабатывающей промышленности [9] или в системах фильтрации и предварительного кондиционирования [10]. Проблемы и особенности изучения двухфазных потоков и возможности их использования для решения различных прикладных задач подробно рассматриваются в обзорах [11, 12]. Целью данной работы является исследование процесса акустического осаждения аэрозоля в закрытой трубе с изменяющимся сечением.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Эксперименты проведены на установке, принципиальная схема которой показана на рис. 1. С помощью устройств, входящих в данную систему, выполнялось возбуждение колебаний вибростендом *1* ES-1-150 (Dongling Vibration) в вертикальной трубе, генерация мелкодисперсного аэрозоля аэрозольным генератором *3* ATM 225 (TOPAS) и определялись изменения концентрации частиц и давления среды. В качестве рабочей среды использовался аэрозоль DEHS. Распределение капель по геометрическому диаметру определялось лазерным спектрометром LAP-320 (TOPAS), диаметр преимущественно был равен 0.863 мкм, что позволяло рассматривать данный аэрозоль как монодисперсную систему [13]. Колебания среды создавались посредством поршня *10* радиусом $R_1 = 0.05$ м, колеблющимся в цилиндре *2* высотой $L_1 = 0.038$ м с аналогичным радиусом R_1, который соединялся со стеклянной трубой *4* длиной $L_0 = 1.09$ м и радиусом $R_0 = 0.018$ м. Труба с изменяющимся сечением в настоящих экспериментах использовалась для интенсификации колебаний среды в трубе для сравнения с результатами в однородной трубе при тех же условиях [14]. Изменение светопроницаемости аэрозоля в трубе вследствие уменьшения его концентрации при осаждении на стенках фиксировалось при помощи

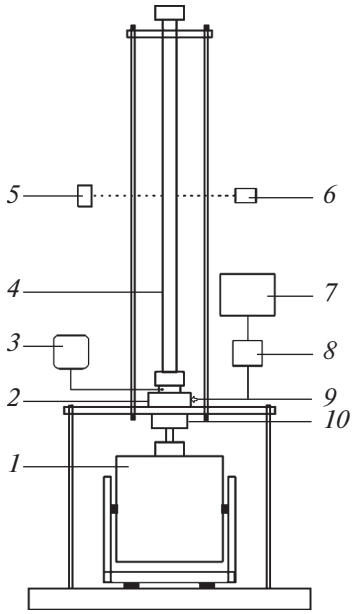

Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки: *1* – вибростенд, *2* – цилиндр, *3* – аэрозольный генератор, *4* – кварцевая труба, *5* – люксметр, *6* – лазер (источник света), *7* – осциллограф, *8* – трехканальный мостовой усилитель, *9* – датчик давления, *10* – поршень.

системы, состоящей из источника света *6* (лазер SYD1230 с длиной волны 650 нм и мощностью 5 мВт) и цифрового люксметра *5* марки ATT-1505 (Актаком) с диапазоном измерения до 50000 люкс и временем замера 0.4 с. Луч света направлялся перпендикулярно по центру трубы, проходил через аэрозоль и попадал на датчик люксметра. Давление среды вблизи поршня измерялось через трехканальный мостовой усилитель напряжения *8* ENDEVCO модели 136 (Bruel & Kjaer) с помощью датчика *9* модели 8530C-15 (Bruel & Kjaer) и записывалось осциллографом *7* DSO 3062A (Agilent Technologies).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Эксперименты для определения режима колебаний выполнены при различных числах Рейнольдса, которые для труб круглого сечения определяются по формуле

$$\mathrm{Re} = \frac{2UR_0}{\nu},$$

где R_0 – гидравлический диаметр, равный внутреннему диаметру трубы; ν – кинематическая вязкость среды 1.51×10^{-5} м^2/с; скорость среды U, задаваемая поршнем в трубе, определяется зависимостью между смещением поршня l и частотой смещения f:

$$U = 2\pi f l.$$

Экспериментально наблюдаемая частота при первом резонансе имеет значение $f_1 = 128$ Гц.

По записанным осциллограммам были построены зависимости безразмерного размаха колебаний давления среды $\Delta\overline{p} = \Delta p/p_0$ (p_0 – атмосферное давление, $\Delta p = p_2 - p_1$, p_2 и p_1 – максимальное и минимальное значения давления за период колебаний поршня) от числа Рейнольдса Re вблизи резонанса (рис. 2а) при амплитуде возбуждения $l = 0.5$ мм. Видно, что для всех исследуемых значений форма волны давления газа сохраняет непрерывный вид и наблюдается слабая деформация формы волны (рис. 2б). С приближением к резонансу размах колебаний давления газа увеличивается. Величина Re меняется от 95 до 970, что соответствует ламинарным потокам в трубе вблизи резонанса. Полученные результаты о влиянии колебания поршня на среду в трубе аппроксимировались степенной функцией

$$\Delta\overline{p} = A\mathrm{Re}^n.$$

На резонансной частоте $A = 0.007$ $n = 0.97$, что соответствует безударно-волновому режиму колебаний и практически совпадает со значением показателя $n = 0.91$ в узкой (радиусом R_0) однородной трубе, тогда как в широкой (радиусом R_1) однородной трубе, где поглощение на стенках меньше, данный показатель имеет другое значение $n = 0.75$, что соответствует переходному режиму. Полученные значения размаха колебаний давления среды на резонансной частоте в трубе с изменяющимся сечением в 1.5 раза больше, чем для однородной трубы при одинаковой интенсивности

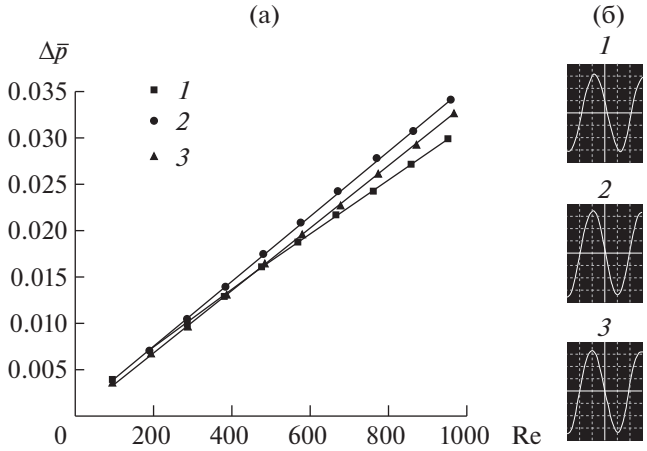

Рис. 2. Зависимость $\Delta\overline{p}$ от Re(l) вблизи резонансной частоты $f_1 = 128$ Гц (а): *1* – 127 Гц, *2* – 128, *3* – 129; сплошные линии – степенная аппроксимация; (б) – осциллограммы давления вблизи резонанса при амплитуде возбуждения среды $l = 0.5$ мм.

колебаний [14]. Однако по сравнению с более широкой однородной трубой значение давления в 0.5 раза меньше [15], что, как уже упоминалось, связано с другим режимом колебаний.

Перейдем к результатам по исследованию осаждения аэрозоля. Количественные значения для осаждения аэрозоля в трубе представлены на рис. 3. Для всех полученных зависимостей характерно монотонное уменьшение концентрации капель аэрозоля со временем от начального значения $N_0 = 8.5 \times 10^5$ 1/см^3 до значения, соответствующего полному осаждению капель на стенки трубы. При отсутствии колебаний характерное время осаждения аэрозоля равно 600 с. Тогда как при колебаниях происходит ускоренное осаждение капель аэрозоля: вблизи резонанса (на частотах 124 и 132 Гц) осаждение заканчивается за 58 и 64 с соответственно, на резонансной частоте (128 Гц) этот процесс завершается еще быстрее – за 50 с. Это связано с тем, что в условиях настоящих экспериментов при резонансе возникает два тороидальных вихря в верхней и нижней половинах трубы, которые вовлекают капли аэрозоля в движение, приводя к их слиянию и более быстрому осаждению на стенки трубы [13]. Для сравнения на резонансной частоте при такой же интенсивности колебаний процесс осаждения в однородной трубе аналогичного радиуса [14] происходит в 2.5 раза медленнее, а в широкой однородной трубе (с бóльшим в 2.7 раза радиусом) [15] в 1.5 раза медленнее, хотя в последнем случае давление имеет большее значение. Это свидетельствует о том, что колебания не оказывают первоочередного влияния на процесс осаждения.

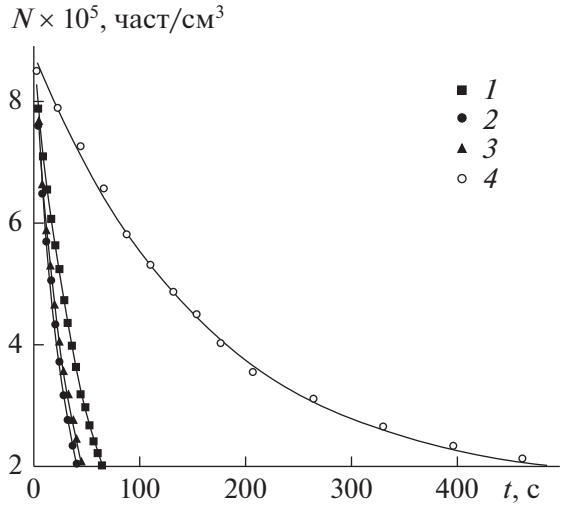

Рис. 3. Характерный вид осаждения частиц аэрозоля со временем вблизи первой резонансной частоты f_1 = = 128 Гц при амплитуде смещения поршня $l = 0.5$ мм и отсутствии колебаний: *1* – 124 Гц, *2* – 128, *3* – 132, *4* – 0.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате экспериментального исследования нелинейных колебаний аэрозоля в закрытой трубе в резонансном режиме показано, что наличие изменяющегося сечения позволяет интенсифицировать колебания среды, а соответственно, и осаждение капель аэрозоля на стенки. Выявлено уменьшение концентрации аэрозоля в трубе со временем на всех исследуемых частотах в 10–12 раз по сравнению с естественным осаждением.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-11-20070).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е.* Нелинейная волновая механика и технологии. Волновые и колебательные явления в основе высоких технологий. М.: Ин-т комп. иссл.; НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, 2011. 780 с.
2. *Руденко О.В., Солуян С.И.* Теоретические основы нелинейной акустики. М.: Наука, 1975. 288 с.
3. *Зарембо Л.К., Красильников В.А.* Введение в нелинейную акустику. М.: Наука, 1966. 519 с.
4. *Нигматулин Р.И.* Динамика многофазных сред. Т. 1. М.: Наука, 1987. 464 с.
5. *Zaripov R.G., Ilhamov M.A.* Non-linear Gas Oscillations in a Pipe // J. Sound Vib. 1976. V. 46. Iss. 2. P. 245.
6. *Min Q.* Generation of Extremely Nonlinear Standing-wave Field Using Loudspeaker-driven Dissonant Tube // J. Acoust. Soc. Am. 2018. V. 143. Iss. 3. P. 1472.
7. *Hamilton M.F., Ilinskii Y.A., Zabolotskaya E.A.* Linear and Nonlinear Frequency Shifts in Acoustic Resonators with Varying Cross Sections // J. Acoust. Soc. Am. 2001. V. 110. Iss. 1. P. 109.
8. *Медников Е.П.* Акустическая коагуляция и осаждение аэрозолей. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 263 с.
9. *Amiri M., Sadighzadeh A., Falamaki C.* Experimental Parametric Study of Frequency and Sound Pressure Level on the Acoustic Coagulation and Precipitation of PM2.5 Aerosols // Aerosol Air Qual. Res. 2016. V. 16. Iss. 12. P. 3012.
10. *Yuen W.T., Fu S.C., Chao C.Y.H.* The Correlation between Acoustic Streaming Patterns and Aerosol Removal Efficiencies in an Acoustic Aerosol Removal System // Aerosol Sci. Technol. 2016. V. 50. № 1. P. 52.
11. *Вараксин А.Ю.* Столкновения частиц и капель в турбулентных двухфазных потоках // ТВТ. 2019. Т. 57. № 4. С. 588.
12. *Вараксин А.Ю.* Двухфазные потоки с твердыми частицами, каплями и пузырями: проблемы и результаты исследований // ТВТ. 2020. Т. 58. № 4. С. 646.
13. *Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Галиуллин Р.Г., Галиуллина Э.Р., Ткаченко Л.А.* Экспериментальное исследование коагуляции аэрозоля в трубе вблизи субгармонического резонанса // ТВТ. 2004. Т. 42. № 5. С. 788.
14. *Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Ткаченко Л.А.* Экспериментальное исследование коагуляции и осаждения аэрозоля в закрытой трубе в безударно-волновом режиме // ТВТ. 2012. Т. 50. № 4. С. 603.
15. *Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Ткаченко Л.А., Шайдуллин Л.Р.* Экспериментальное исследование коагуляции и осаждения газовзвеси в закрытой трубе при переходе к ударно-волновому режиму // ТВТ. 2017. Т. 55. № 3. С. 484.