

УДК 532.529:534.2

РЕЗОНАНСНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ГАЗА И АЭРОЗОЛЯ В ОТКРЫТОЙ ТРУБЕ СО СКАЧКОМ СЕЧЕНИЯ

© 2023 г. Д. А. Губайдуллин^{1, 2, *}, Р. Г. Зарипов¹,
Л. А. Ткаченко¹, Л. Р. Шайдуллин¹, С. А. Фадеев¹

¹Институт механики и машиностроения ФИЦ Казанский научный центр РАН, г. Казань, Россия

²Институт математики и механики им. Н.И. Лобачевского,
Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

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

Поступило в редакцию 27.07.2022 г.

После доработки 03.11.2022 г.

Принято к публикации 06.12.2022 г.

Исследованы колебания газа и динамика аэрозоля при резонансной частоте в открытой трубе с изменяющимся сечением. Получены зависимости амплитуды колебаний давления газа и времени осаждения аэрозоля при различных амплитудах смещения поршня при резонансе. Наличие изменяющегося сечения позволило получить более интенсивные колебания в сравнении с однородной трубой, при этом форма волны давления сохраняла непрерывный и близкий к гармоническому вид для всех рассматриваемых амплитуд возбуждения. Выявлено уменьшение концентрации капель аэрозоля со временем, ускоряющееся с ростом амплитуды смещения поршня.

DOI: 10.31857/S0040364423010209

ВВЕДЕНИЕ

Технология, основанная на генерации нелинейных колебаний среды в резонаторах [1], охватывает широкий круг проблем в различных областях техники, связанных как с интенсификацией процессов переноса, сепарации и осаждения частиц [2], так и с повышением надежности и производительности различных объектов при акустическом воздействии [3]. Как известно, в акустических полях возникают силы, приводящие к направленному движению дисперсной фазы. Описание дрейфа и динамики дисперсных частиц в несущей среде приведено в работах [4, 5]. Последние результаты исследований динамики различных газовзвесей и отдельных частиц в волновых полях с учетом акустических течений в резонаторах разнообразных форм и размеров даны в [6]. Простым примером четвертьволнового резонатора является открытая труба [7–9]. В [10] рассмотрен такой резонатор, который позволяет под действием акустического излучения манипулировать частицами в среде. Осаждение полидисперсного и монодисперсного аэрозолей в волновом поле открытой трубы вблизи резонанса изучено в [11, 12]. Проблемы взаимодействия частиц в потоке и возможности их использования в прикладных задачах проанализированы в [13, 14]. Повышение эффективности рассмотренных процессов наблюдается с увеличением амплитуды колебаний [15]. В связи с этим представляются важными исследования резонаторов, в которых при росте амплиту-

ды возбужденных колебаний с сохранением энергосодержания время осаждения аэрозоля уменьшается. Одним из таких резонаторов является труба, сечение которой изменяется в осевом направлении [16, 17]. Колебания газа и динамика аэрозоля в закрытой трубе со скачком сечения изучены в [18].

Целью данной работы является исследование колебаний газа и осаждения аэрозоля в открытой трубе с изменяющимся сечением при резонансной частоте возбуждения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В экспериментах рассматривается открытая труба со скачком сечения, состоящая из двух частей (рис. 1) [19]. Широкая секция представляет собой цилиндр b высотой $L_1 = 0.038$ м и радиусом $R_1 = 0.05$ м, в котором по гармоническому закону совершает колебания плоский поршень 2 с частотой f и амплитудой смещения l . Цилиндр герметично соединен со стеклянной трубой 5 длиной $L_0 = 1.052$ м и радиусом $R_0 = 0.01825$ м. Полное расстояние от поршня до открытого конца трубы составляет 1.09 м. Верхний конец трубы сообщается с окружающей средой. Эксперименты проводились в воздухе при нормальных условиях и температуре окружающей среды 25°C.

Колебания создаются электродинамическим виброгенератором 1 марки ES-1-150 (Dongling Vibration) с воздушным охлаждением и усилителем мощности марки SDA-1. Управление и контроль

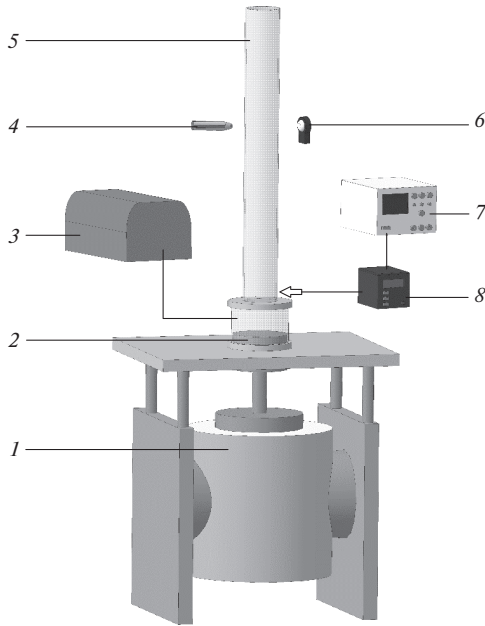


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 – виброгенератор, 2 – поршень, 3 – аэрозольный генератор, 4 – лазер, 5 – стеклянная труба, 6 – люксметр, 7 – осциллограф, 8 – усилитель.

вибростендом осуществляются через специальное программное обеспечение на ноутбуке посредством пьезоэлектрического акселерометра марки AP2037-100 фирмы “Глобал Тест” (Россия) и контроллера VENZO 880 (DynaTronic Corporation). Давление измеряется с помощью датчика модели 8530C-15 (ENDEVCO), сигнал с которого через трехканальный мостовой усилитель напряжения 8 (модель 136, ENDEVCO) подается на цифровой осциллограф 7 (модели DSO 3062A, Agilent Technologies). Частоты и амплитуды колебаний поршня задаются с точностью до 10^{-3} Гц и 10^{-5} м соответственно, погрешность измерения размаха колебаний давления среды составляет 0.2%.

Для генерации аэрозоля используется жидкий диэтилгексилсебацинат. Аэрозоль с диаметром капель ~ 0.863 мкм [6] создается аэрозольным генератором 3 (марка ATM225 фирмы TOPAS). Время осаждения аэрозоля определяется с использованием оптической системы, состоящей из источника света 4, в качестве которого используется лазер SYD1230 с длиной волны 650 нм и мощностью 5 мВт, и цифрового люксметра 6 (марка АТТ-1505, Актакон). Свет проходит через аэрозоль перпендикулярно оси трубы и попадает в центр светочувствительного датчика люксметра. Полученные с погрешностью 4% показания датчика люксметра переводятся в значения концентрации капель аэрозоля [12].

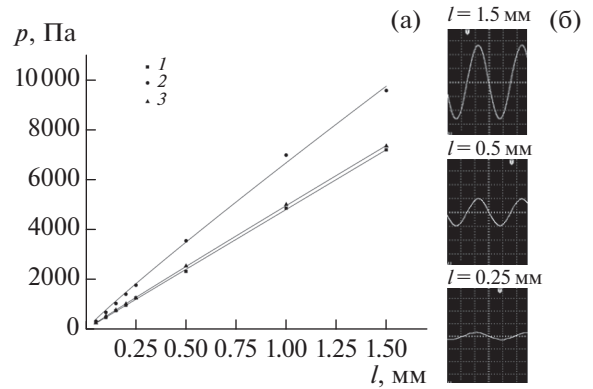


Рис. 2. Зависимость p от l при различных частотах (а): 1 – $f = 60$ Гц, 2 – 64, 3 – 68; осциллограммы колебаний давления газа для различных амплитуд смещения поршня при резонансе (б).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим результаты экспериментального исследования по вынужденным продольным колебаниям газа. Осциллограммы и зависимости амплитуды колебания давления газа p от амплитуды смещения поршня l показаны на рис. 2. Наблюдается увеличение давления с ростом амплитуды смещения поршня. Увеличение амплитуды в 6 раз приводит к увеличению давления в 5.4 раза при резонансной частоте. При фиксированных значениях амплитуды смещения поршня с приближением к резонансу давление газа также растет. При этом для малых значений амплитуды это изменение меньше, чем для больших. Максимальные значения давления достигаются при резонансной частоте $f_1 = 64$ Гц. Полученные экспериментальные данные аппроксимируются степенной зависимостью

$$p = Al^n,$$

где n при колебаниях газа в резонансе равен 0.82. Форма волны давления при всех исследуемых частотах и амплитудах сохраняет непрерывный, близкий к гармоническому вид (рис. 2б). В сравнении с однородной открытой трубой аналогичного радиуса при одинаковой амплитуде смещения поршня $l = 0.5$ мм [20] наличие скачка сечения в трубе приводит к увеличению амплитуды колебаний давления газа в 2.4 раза. Ввиду того что $L_1 \ll L_0$ и $l \ll L_0$, резонансная частота вычислялась по приведенной длине трубы L и амплитуде смещения поршня m^2l

$$L = L_0 + \sigma R_0 + m^2 L_1 + m^2 l, \quad (1)$$

где σR_0 – поправка Рэлея (в отсутствие фланца $\sigma = 0.6133$), $m^2 L_1$ – эффективная высота цилиндра с $m = R_1/R_0$ [19].

Следует отметить, что в случае одинакового расстояния от поршня до открытого конца для однородной трубы и трубы со скачком сечения у последней резонансная частота $f = c_0/4L$ ниже вследствие увеличения приведенной длины. При этом известно, что вибростенд имеет ограничение по максимальной амплитуде ускорения

$$a = \omega^2 l = \text{const},$$

где угловая частота $\omega = 2\pi f$ [21]. Следовательно, для конкретного значения максимальной амплитуды ускорения в экспериментах удастся увеличить амплитуду смещения поршня l и эффективно использовать виброгенератор при сохранении продольного размера резонатора.

Оценивая резонансную частоту открытой трубы со скачком сечения по линейной теории, с учетом выражения (1) получаем $f_1^* = 63.4$ Гц, что хорошо согласуется с экспериментальным значением.

В результате экспериментальных исследований также получены зависимости концентрации капель аэрозоля от времени при различных амплитудах смещения поршня при резонансной частоте $f_1 = 64$ Гц и в отсутствие колебаний. Начальная концентрация капель для всех случаев составляет $N_0 = 3.4 \times 10^6 \text{ см}^{-3}$, что соответствует малому объемному $\alpha = 5.38 \times 10^{-5}$ и массовому $m = 4.1 \times 10^{-3}$ содержаниям частиц аэрозоля в трубе [4]. Наблюдается немонотонное уменьшение концентрации капель (рис. 3), и данные хорошо аппроксимируются показательной функцией [2, 22]

$$N = B e^{-Kt},$$

где постоянные коэффициенты имеют следующие значения: $B = 3.4$, $K = 0.03$ при $l = 0.5$ мм.

В трубе при наличии колебаний наблюдается ускоренное осаждение аэрозоля, которое происходит более эффективно с увеличением амплитуды смещения поршня. При амплитуде $l = 1.5$ мм происходит наиболее резкое падение концентрации капель и процесс осаждения протекает в шесть раз быстрее, чем на амплитуде $l = 0.5$ мм, и в девять раз быстрее по сравнению со случаем $l = 0.25$ мм. Зависимость времени осаждения от амплитуды носит нелинейный характер и описывается полиномиальной функцией. Ускоренное осаждение объясняется тем, что при колебаниях при резонансе возникает акустическое течение в виде одного тороидального вихря, занимающего весь объем трубы, который вовлекает аэрозоль в движение и приводит к последующему осаждению на стенках. При этом часть аэрозоля выбрасывается в окружающую среду [11]. По сравнению с характерным временем естественного осаждения аэрозоля на максимальной исследуемой амплитуде смещения поршня ($l = 1.5$ мм) осаждение проис-

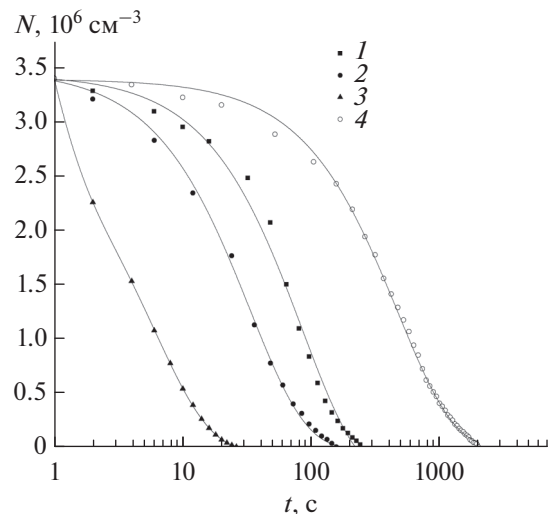


Рис. 3. Зависимость от времени концентрации капель аэрозоля при резонансной частоте $f_1 = 64$ Гц и различных значениях амплитуд смещения поршня: 1 – $l = 0.25$ мм, 2 – 0.5, 3 – 1.5, 4 – при естественном осаждении ($l = 0$); кривые – показательная функция.

ходит в 80 раз быстрее. В однородной открытой трубе [20] время осаждения аэрозоля в 1.4 раза больше, чем в настоящих экспериментах при наличии скачка сечения при максимальной исследуемой амплитуде возбуждения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены исследования колебаний газа и осаждения аэрозоля при резонансе в открытой трубе со скачком сечения в широком диапазоне амплитуд возбуждения. Показано, что наличие изменяющегося сечения позволяет получить более интенсивные колебания по сравнению с однородной трубой с сохранением непрерывной гармонической формы волны давления среды. Выявлено уменьшение концентрации капель аэрозоля в трубе со временем при всех исследуемых амплитудах колебаний в резонансном режиме. Уменьшение концентрации аэрозоля при резонансных колебаниях газа происходит в 9 (при $l = 0.25$ мм) и 80 раз ($l = 1.5$ мм) быстрее по сравнению с естественным осаждением.

Исследования вынужденных продольных колебаний газа в открытой трубе со скачком сечения выполнены за счет средств программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета (“ПРИОРИТЕТ-2030”). Изучение осаждения аэрозоля на резонансной частоте возбуждения проведено в рамках госзадания ФИЦ КазНЦ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rudenko O.V.* Nonlinear Standing Waves, Resonance Phenomena, and Frequency Characteristics of Distributed Systems // *Acoust. Phys.* 2009. V. 55. № 1. P. 27.
2. *Медников Е.П.* Акустическая коагуляция и осаждение аэрозолей. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 263 с.
3. *Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е.* Нелинейная волновая механика и технологии. Волновые и колебательные явления в основе высоких технологий. Изд. 2-е, доп. М.: Ин-т комп. иссл., 2011. 780 с.
4. *Нигматулин Р.И.* Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987. Т. 1. 464 с.
5. *Губайдуллин Д.А., Осипов П.П.* Аэрогидродинамика дисперсной частицы. М.: Физматлит, 2020. 176 с.
6. *Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Осипов П.П., Ткаченко Л.А., Шайдудллин Л.Р.* Волновая динамика газовзвесей и отдельных частиц при резонансных колебаниях (обзор) // *ТВТ.* 2021. Т. 59. № 3. С. 443.
7. *Amundsen D.E., Mortell M.P., Seymour B.R.* Resonant Oscillations in Open Axisymmetric Tubes // *Z. Angew. Math. Phys.* 2017. V. 68. P. 139.
8. *Зарипов Р.Г.* Нелинейные колебания газа в открытой трубе // *Акуст. журн.* 1977. Т. 23. № 3. С. 378.
9. *Seymour B.R., Mortell M.P.* Nonlinear Resonant Oscillations in Open Tubes // *J. Fluid Mech.* 1973. V. 60. № 4. P. 733.
10. *Townsend R.J., Hill M., Harris N.R., McDonnell M.B.* Performance of a Quarter-wavelength Particle Concentrator // *Ultrasonics.* 2008. V. 48. P. 515.
11. *Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Ткаченко Л.А., Шайдудллин Л.Р.* Осаждение дыма при нелинейных колебаниях в открытой трубе вблизи резонанса // *ТВТ.* 2019. Т. 57. № 5. С. 793.
12. *Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Ткаченко Л.А., Шайдудллин Л.Р.* Динамика аэрозоля в открытой трубе при колебаниях различной интенсивности вблизи резонанса // *ТВТ.* 2018. Т. 56. № 1. С. 145.
13. *Вараксин А.Ю.* Столкновения частиц и капель в турбулентных двухфазных потоках // *ТВТ.* 2019. Т. 57. № 4. С. 588.
14. *Вараксин А.Ю.* Двухфазные потоки с твердыми частицами, каплями и пузырями: проблемы и результаты исследований // *ТВТ.* 2020. Т. 58. № 4. С. 646.
15. *Ilinskii Y.A., Lipkens B., Lucas T.S., Van Doren T.W., Zabolotskaya E.A.* Nonlinear Standing Waves in an Acoustical Resonator // *J. Acoust. Soc. Am.* 1998. V. 104. P. 2664.
16. *Chun Y.D., Kim Y.H.* Numerical Analysis for Nonlinear Resonant Oscillations of Gas in Axisymmetric Closed Tubes // *J. Acoust. Soc. Am.* 2000. V. 108. P. 2765.
17. *Ни А.Л.* Нелинейные околорезонансные колебания газа в трубе переменного сечения // *ПМТФ.* 1985. № 3. С. 106.
18. *Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Ткаченко Л.А., Шайдудллин Л.Р.* Экспериментальное исследование осаждения аэрозоля в закрытой трубе с изменяющимся сечением // *ТВТ.* 2022. Т. 60. № 1. С. 443.
19. *Tkachenko L.A., Shaidullin L.R., Kabirov A.A.* Acoustothermal Effect in an Open Tube with Section Leap for Non-linear Gas Vibrations // *Lobachevskii J. Mathematics.* 2020. V. 41. № 7. P. 1300.
20. *Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Ткаченко Л.А.* Экспериментальное исследование колебаний аэрозоля в открытой трубе в безударно-волновом режиме // *ТВТ.* 2013. Т. 51. № 6. С. 955.
21. *Бейкер Р.* Введение в теорию виброиспытаний. М.: LDS, 1994. 44 с.
22. *Gubaidullin D.A., Zaripov R.G., Tkachenko L.A., Shaidullin L.R.* Deposition of Polydisperse Gas Suspensions with Nonlinear Resonance Oscillations in a Closed Tube // *J. Acoust. Soc. Am.* 2019. V. 145. P. EL30.