

УДК 532.529:534.2

ВЫНУЖДЕННЫЕ ПРОДОЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ГАЗА И АЭРОЗОЛЯ В ОТКРЫТОЙ ТРУБЕ СО СКАЧКОМ СЕЧЕНИЯ

© 2023 г. Член-корреспондент РАН Д. А. Губайдуллин^{1,*},
Л. Р. Шайдуллин^{1,**}, С. А. Фадеев^{1,***}

Поступило 07.07.2022 г.

После доработки 25.10.2022 г.

Принято к публикации 08.12.2022 г.

Экспериментально исследуются вынужденные продольные колебания газа и аэрозоля в открытой трубе со скачком сечения. Наблюдается интенсификация колебаний газа в трубе со скачком сечения в сравнении с однородной трубой, при этом сохраняется близкий к гармоническому, непрерывный вид формы волны давления. Обнаружена немонотонная зависимость времени осаждения аэрозоля от частоты колебаний с минимальным значением на резонансной частоте.

Ключевые слова: колебания газа, аэрозоль, осаждение, скачок сечения, труба, резонанс

DOI: 10.31857/S2686740023030082, **EDN:** OYQABZ

Волновые технологии многофазных систем охватывают широкий круг проблем нелинейной волновой механики по обработке и транспортировке многофазных сред с целью интенсификации технологических процессов, повышения надежности и производительности оборудования или его отдельных элементов [1, 2]. В ряде технических устройств используются свойства резонаторов, открытых с одного конца, где представляются важными для изучения процессы при течениях газа внутри объема и возникающих при этом течений в окружающем пространстве [3–5]. В данных условиях на поведение газа оказывают влияние следующие факторы: форма открытого торца трубы [6], геометрические параметры фланца [7] и свойства окружающей среды [8]. Наличие вихревых структур и струйных течений вблизи границ резонатора можно использовать для управления взвешенными частицами в газе. Данный процесс находит широкое практическое применение в очистке промышленных выбросов от дисперсных примесей. Аппараты по очистке газов от дисперсной фазы являются важной составляющей современной промышленности. Акустические колебания — одно из эффективных решений интенсификации процессов осаждения в объемах, ограниченных твердыми стенками (резонаторах).

Известны исследования осаждения полидисперсного и монодисперсного аэрозолей в открытых трубах вблизи резонанса [9], использование нелинейных эффектов в волновом поле для удаления аэрозоля [10]. В работе [11] приведены результаты исследований дрейфа и динамики дисперсных частиц в волновом поле. Изучено осаждение аэрозоля в однородных трубах разного диаметра вблизи резонансов [12, 13]. Представляется важным увеличение амплитуды возбужденных колебаний в резонаторах с сохранением массогабаритных характеристик устройства. Исследования в данном направлении показывают, что такими свойствами обладают резонаторы с изменяющимся сечением [14, 15].

В сообщении исследуются резонансные колебания газа и динамика аэрозоля в открытой трубе со скачком сечения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводятся в трубе, состоящей из двух частей (рис. 1) [16]. Широкая секция представляет собой цилиндр 8 высотой $L_1 = 0.038$ м и радиусом $R_1 = 0.05$ м, в которой по гармоническому закону совершает колебания плоский поршень 2 частотой f и амплитудой возбуждения l . Цилиндр герметично соединен со стеклянной трубой 3 длины $L_0 = 1.052$ м и радиуса $R_0 = 0.01825$ м. Верхняя граница трубы открыта и сообщается с окружающей средой.

¹ Институт механики и машиностроения,
Федеральный исследовательский центр
“Казанский научный центр Российской академии наук”,
Казань, Россия

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

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

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

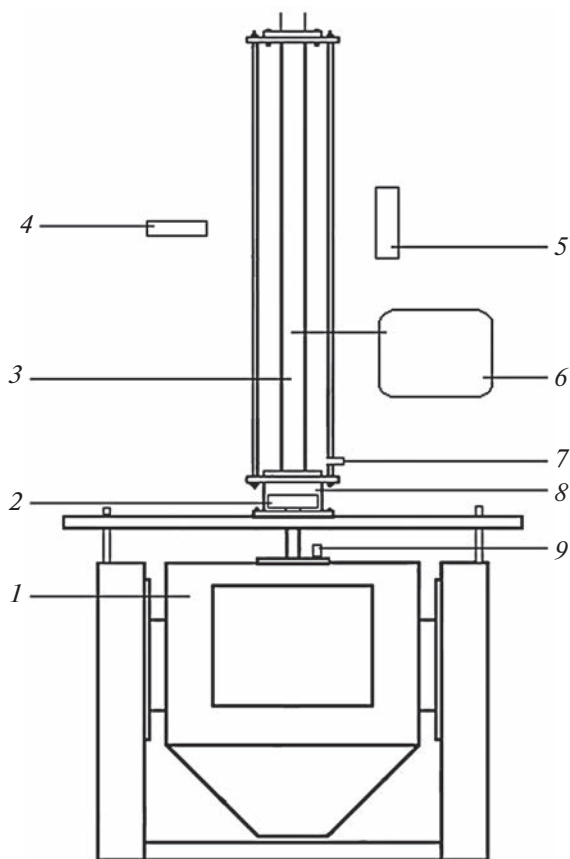


Рис. 1. Экспериментальная установка. 1 – виброгенератор, 2 – поршень, 3 – стеклянная труба, 4 – лазер, 5 – датчик люксметра, 6 – аэрозольный генератор, 7 – датчик давления, 8 – цилиндр, 9 – акселерометр.

Колебания создаются электродинамическим виброгенератором 1 ES-1-150 (Dongling Vibration). Управление и контроль вибростендом, состоящим из виброгенератора и рассматриваемой трубы, осуществляется контроллером VENZO 880 (DynaTronic Corporation) по каналу обратной связи через пьезоэлектрический акселерометр 9 AP2037-100 (Глобал Тест). Давление измеряется с помощью датчика модели 8530C-15 (Bruel & Kjaer), сигнал с которого через трехканальный мостовой усилитель напряжения ENDEVCO 136 (Bruel & Kjaer) подается на цифровой осциллограф DSO 3062A (Agilent Technologies).

Жидкостью для генерации аэрозоля является DEHS с размерностью частиц около 0.863 мкм [9]. Распыление мелкодисперсных частиц создается с помощью аэрозольного генератора 6 ATM 225 (TOPAS). Время осаждения аэрозоля определяется с использованием оптической системы, состоящей из источника света в виде лазера 4 SYD1230 (длина волны 650 нм, мощность 5 мВт) и цифрового люксметра АТТ-1505 (Актаком). Свет проходит через трубу с аэрозолем перпендику-

лярно оси и попадает в центр светочувствительного датчика люксметра 5. Результатом обработки данных показаний люксметра являются зависимости концентраций частиц от времени в процессе просветления и осаждения аэрозоля.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

По полученным экспериментальным данным построена амплитудно-частотная характеристика давления газа вблизи резонансной частоты $f_1 = 64$ Гц при амплитудах возбуждения $l = 0.25, 0.5, 1$ мм (рис. 2а). Как видно, максимальное значение давления на фиксированной амплитуде возбуждения наблюдается на резонансной частоте, при удалении от которой интенсивность колебаний уменьшается. Отметим, что на дорезонансных частотах происходит более медленный рост интенсивности колебаний, а после равного удаления от резонанса значения для после резонансных частот несколько выше. На рис. 2б приведены осциллограммы с записями колебаний давления газа во времени при амплитуде возбуждения $l = 0.5$ мм вблизи резонансной частоты. На резонансе длительность переднего фронта равна 7.77 мс, заднего 7.91 мс. Как видно, форма волны давления близка к гармонической и сохраняет непрерывный вид. При этом в сравнении с однородной открытой трубой аналогичного радиуса при равной амплитуде возбуждения, наличие скачка сечения приводит к увеличению амплитуды колебаний давления газа в 2.4 раза [12].

На рис. 3 представлена зависимость концентрации частиц аэрозоля от времени для амплитуды возбуждения $l = 0.5$ мм при различных значениях частоты возбуждения. Наблюдается ускоренное уменьшение концентрации частиц аэрозоля со временем по сравнению с естественным осаждением. С приближением к резонансу наблюдается интенсификация процессов осаждения частиц и полное просветление аэрозоля происходит за 48 с. Данное значение в 1.25 раза меньше, чем осаждение на резонансной частоте в закрытой трубе при равных амплитудах возбуждения [16]. Отметим, что для открытой трубы в отсутствие колебаний естественное осаждение происходит в 3 раза медленнее.

По экспериментальным данным определялись зависимости времени осаждения аэрозоля от частоты и амплитуды возбуждения (рис. 4). Минимальное время полного осаждения наблюдается на резонансной частоте для всех рассматриваемых амплитуд возбуждения, где амплитуда колебаний давления максимальна (рис. 2а, б), что свидетельствует об отсутствии влияния концентрации аэрозоля в рассматриваемых случаях на резонансную частоту трубы [2]. Наблюдается немонотонная зависимость времени осаждения аэрозоля от частоты. С увеличением амплитуды

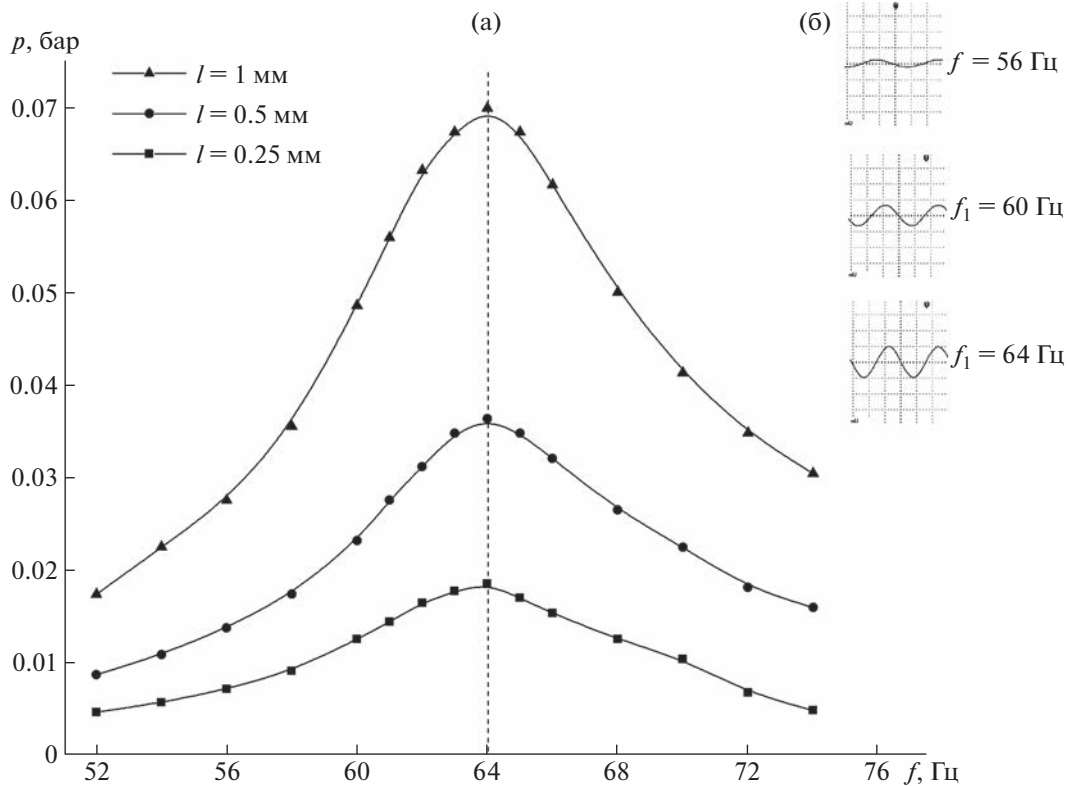


Рис. 2. *a* – Амплитудно-частотная характеристика колебаний давления газа вблизи резонансной частоты 64 Гц (точки – экспериментальные результаты, сплошные линии – сплайн-аппроксимация); *б* – осциллограммы колебаний давления газа вблизи резонанса при $l = 0.5$ мм.

возбуждения время просветления аэрозоля монотонно уменьшается.

Резонансные колебания газа сопровождаются рядом нелинейных эффектов: генерация высших гармоник [17], возникновение вторичных акустических течений [18], акустотермические процессы [19], образование пульсирующей струи во внешнем волновом поле вблизи открытого конца [20] и др. Ускоренное осаждение аэрозоля объясняется тем, что в открытой трубе при колебаниях газа на собственной частоте возникает вторичное акустическое течение в виде одного тороидального вихря, занимающего практически весь объем трубы. Акустическое течение вовлекает аэрозоль в движение, что приводит к последующему осаждению на стенках.

Проведем оценку акустического числа Маха для условий эксперимента по известному выражению [21]

$$M_a = \frac{u_1}{c_0} = \frac{p_1}{\rho_0 c_0^2},$$

где u_1 – амплитуда колебаний скорости газа, ρ_0 – плотность газа, c_0 – скорость звука. Для амплитуды возбуждения $l = 1$ мм акустическое число Маха составляет $M_a \approx 5 \times 10^{-2}$. Тогда оценка макси-

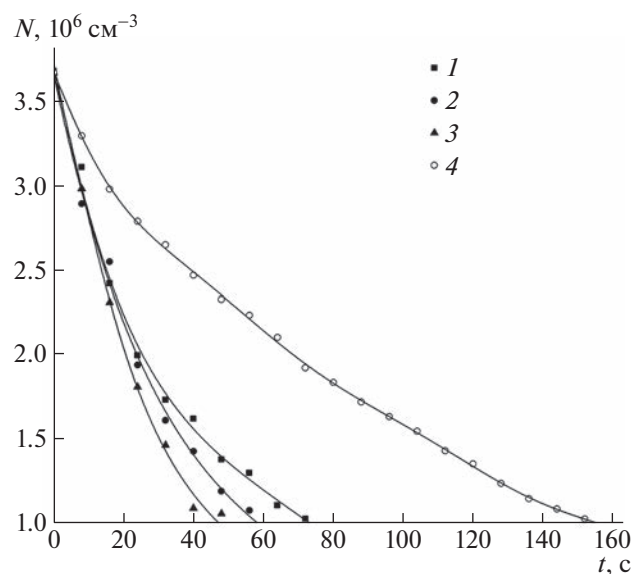


Рис. 3. Зависимость концентрации капель аэрозоля от времени для $l = 0.5$ мм и $1 - 56$ Гц, $2 - 60$ Гц, $3 - 64$ Гц, 4 – естественное осаждение. Линия – полиномиальная аппроксимация.

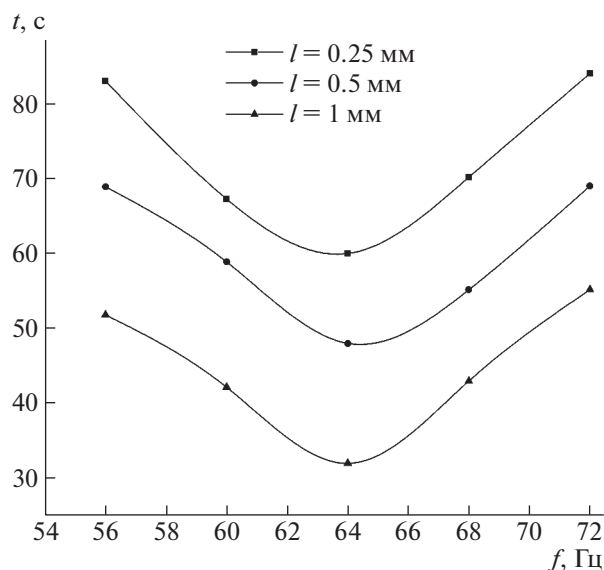


Рис. 4. Зависимость времени осаждения аэрозоля от частоты возбуждения. Сплошная линия — сплайн-аппроксимация.

мальной скорости акустического течения на оси трубы по формуле [22–24]

$$u_2 = \frac{3u_1^2}{8c_0} \quad \text{или} \quad u_2 = \frac{3M_a p_1}{8\rho_0 c_0},$$

дает $u_2 \approx 0.32$ м/с и характерное время процессов переноса за счет акустического течения $\tau = \lambda/u_2 \approx 13.6$ с, где λ — длина волны. Тот же порядок имеет время осаждения аэрозоля при резонансных колебаниях газа и рассматриваемой амплитуде возбуждения $l = 1$ мм (рис. 4), что свидетельствует о влиянии акустических течений на процесс осаждения аэрозоля.

Проведены исследования нелинейных колебаний газа и осаждения аэрозоля вблизи резонансной частоты в открытой трубе со скачком сечения при различных амплитудах возбуждения. Показано, что наличие скачка сечения позволяет интенсифицировать колебания среды, сохраняя близкий к гармоническому, непрерывный вид формы волны давления. Выявлено уменьшение концентрации аэрозоля в трубе со временем на всех исследуемых частотах. При резонансных колебаниях газа просветление аэрозоля происходит в 3 раза быстрее в сравнении с естественным осаждением. Обнаружена немонотонная зависимость времени осаждения аэрозоля от частоты колебаний для всех рассмотренных амплитуд возбуждения с минимальным значением на резонансной частоте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Нелинейная волновая механика и технология. М.: Науч.-издат. центр “Регулярная и хаотическая динамика”, 2008. 712 с.

2. Нигматуллин Р.И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987. Т. 1. 464 с.
3. Seymour B.R., Mortell M.P. // J. Fluid Mech. 1973. V. 60. № 4. P. 733–749. <https://doi.org/10.1017/S0022112073000443>
4. Галиуллин Р.Г., Галиуллина Э.Р., Пермяков Е.И. // Акуст. жур. 1996. Т. 42. № 6. С. 769–772.
5. Amundsen D.E., Mortell M.P., Seymour B.R. // Z. Angew. Math. Phys. 2017. V. 68. P. 139. <https://doi.org/10.1007/s00033-017-0888-3>
6. Sturtevant B.B., Keller J. // Z. Angew. Math. Phys. 1978. V. 29. № 3. P. 473–485. <https://doi.org/10.1007/BF01590768>
7. Levine H., Schwinger J. // Physical Review. 1948. V. 73. P. 383–406. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.73.383>
8. Медников Е.П. Акустическая коагуляция и осаждение аэрозолей. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 263 с.
9. Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Осипов П.П., Ткаченко Л.А., Шайдуллин Л.Р. // ТВТ. 2021. Т. 59. № 3. С. 443–466. <https://doi.org/10.31857/S0040364421030054>
10. Yuen W.T., Fu S.C., Kwan J.K.C., Chao C.Y.H. // Aerosol Science and Technology. 2014. V. 48. № 9. P. 907–915. <https://doi.org/10.1080/02786826.2014.938800>
11. Губайдуллин Д.А., Осипов П.П. Аэрогидродинамика дисперсной частицы. М.: Физматлит, 2020. 176 с.
12. Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Ткаченко Л.А. // ДАН. 2013. Т. 452. № 2. С. 161–164. <https://doi.org/10.7868/S0869565213270108>
13. Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Ткаченко Л.А. // ДАН. 2017. Т. 475. № 3. С. 273–276. <https://doi.org/10.7868/S0869565217210083>
14. Hamilton M.F., Ilinskii Y.A., Zabolotskaya E.A. // J. Acoust. Soc. Am. 2001. V. 110. № 1. P. 109–119. <https://doi.org/10.1121/1.1379080>
15. Cervenka M., Soltes M., Bednarik M. // The Journal of the Acoustical Society of America. 2014. V. 136. № 3. P. 1003–1012. <https://doi.org/10.1121/1.4892751>
16. Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Ткаченко Л.А., Шайдуллин Л.Р. // ТВТ. 2022. Т. 60. № 1. С. 146–148. <https://doi.org/10.31857/S0040364422010057>
17. Rudenko O.V. // Acoust. Phys. 2009. V. 55. № 1. P. 27–54. <https://doi.org/10.1134/S1063771009010047>
18. Руденко О.В., Солуян С.И. Теоретические основы нелинейной акустики. М.: Наука, 1975. 289 с.
19. Ilgamov M.A., Zaripov R.G., Galiullin R.G., Repin V.B. // Appl. Mech. Rev. 1996. V. 49. № 3. P. 137–154.
20. Hudson G.E. Thrust on a piston driven half-open tube // J. Acoust. Soc. Am. 1955. V. 27. № 3. P. 406–416.
21. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику. М.: Наука, 1984. 400 с.
22. Зарембо Л.К., Красильников В.А. Введение в нелинейную акустику. М.: Наука, 1966. 520 с.
23. Галиуллин Р.Г., Тимохина Л.А., Филипов С.Е. // Акустический журнал. 2001. Т. 47. № 5. С. 611–615.
24. Hamilton M.F., Ilinskii Y.A., Zabolotskaya E.A. // J. Acoust. Soc. Am. 2003. V. 114. P. 3092–3101.

FORCED LONGITUDINAL OSCILLATIONS OF GAS AND AEROSOL IN AN OPEN TUBE WITH A CROSS-SECTION JUMP

Corresponding Member of the RAS **D. A. Gubaidullin^a, L. R. Shaidullin^a, and S. A. Fadeev^a**

^a *Institute of Mechanics and Engineering, Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia*

The forced longitudinal oscillations of gas and aerosol in an open tube with a cross-section jump near the resonance frequency are investigated experimentally. The intensification of gas oscillations in the tube with a cross-section jump in comparison with a homogeneous tube is observed, while preserving a close to harmonic, continuous pressure waveform. A non-monotone dependence of the aerosol deposition time on the frequency of oscillations with a minimum value at the resonance frequency is observed.

Keywords: oscillations of a gas, aerosol, deposition, cross-section jump, tube, resonance