

УДК 534-13: 534.23

## ОСАЖДЕНИЕ ПОЛИДИСПЕРСНОГО АЭРОЗОЛЯ В УЗКОЙ ЗАКРЫТОЙ ТРУБЕ ПРИ РЕЗОНАНСНОМ РЕЖИМЕ КОЛЕБАНИЙ

© 2023 г. Д. А. Губайдуллин\*, Р. Г. Зарипов, Л. А. Ткаченко, Л. Р. Шайдуллин, С. А. Фадеев

*Институт механики и машиностроения – ФИЦ Казанский научный центр РАН, Казань, Россия**\*E-mail: gubaidullin@imm.knc.ru*

Поступило в редакцию 09.06.2023 г.

После доработки 31.10.2023 г.

Принято к публикации 31.10.2023 г.

Экспериментально исследованы нелинейные колебания газа и осаждения табачного дыма при резонансе в узкой закрытой трубе. На полученных осциллограммах наблюдается асимметричность переднего и заднего фронтов волны давления. С возрастанием амплитуды колебаний поршня выявлено увеличение уровня звукового давления газа до 163 дБ при максимальной исследуемой амплитуде возбуждения 0.3 мм. Осаждение частиц табачного дыма в резонансном режиме колебаний с амплитудой возбуждения 0.3 мм происходит в 24 раза быстрее по сравнению с естественным осаждением.

DOI: 10.31857/S0040364423060078

### ВВЕДЕНИЕ

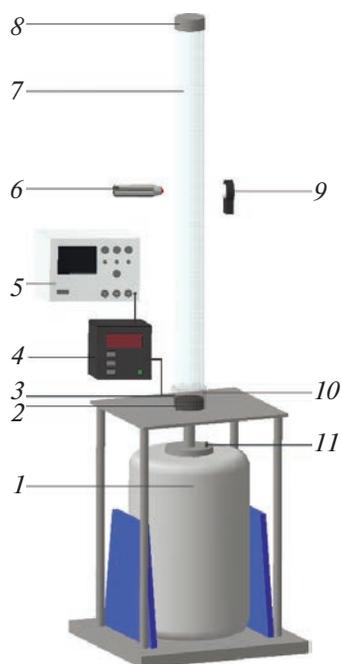
Динамические процессы в однородном газе и в многофазных средах нередко наблюдаются при различных природных явлениях и широко распространены во многих сферах человеческой деятельности [1–3]. Например, акустические колебания в аэрозоле, при которых происходит его коагуляция, осаждение и другие физические процессы [4]. Известно, что эффективность данных процессов зависит от дисперсного состава аэрозольных частиц, концентрации аэрозоля, свойств дисперсной среды, параметров колебаний. В обзорах [5, 6] рассмотрены экспериментальные и теоретические исследования двухфазных потоков и динамика частиц аэрозоля в волновых полях. Высокодисперсные фракции частиц коагулируют интенсивнее, чем средне- или крупнодисперсные, однако времени на их полное осаждение требуется намного больше. Ускорение физических процессов наблюдается при сильно интенсивных колебаниях или при наличии в системе твердых полидисперсных частиц. На практике наиболее благоприятны для акустического воздействия аэрозоли средней дисперсности, около 10 мкм. Обычно средняя дисперсность характерна для аэрозолей в виде табачного дыма [7]. Исследования осаждения дыма в закрытой трубе показали, что при определенных концентрациях слабые ударные волны обеспечивают высокую скорость коагуляции по сравнению с синусоидальными колебаниями газа большей амплитуды [8, 9]. При этом выявлено, что присутствие частиц дыма различной плотности в акустическом поле может влиять на стоячую волну и, соответственно, на значение резонансной частоты трубы [10]. Полученные результаты при-

менимы при агрегации, фрагментации, сепарации, осаждении, удалении и переносе частиц дыма [11–15]. Ранее исследовано осаждение дыма в широкой закрытой трубе при переходе к ударно-волновому режиму и при различных степенях заполнения трубы [16–18]. Установлено ускоренное осаждение частиц при колебаниях газа с резонансной частотой с наименьшим временем для случая трубы, заполненной дымом наполовину. В настоящей работе исследуется осаждение полидисперсного аэрозоля в виде табачного дыма при нелинейных колебаниях среды с первой резонансной частотой в узкой закрытой трубе. Данные результаты могут быть использованы для решения актуальных проблем экологии атмосферы, загрязненной выбросами дыма, на различных промышленных объектах.

Целью данной работы является исследование колебаний газа и осаждения табачного дыма в узкой закрытой трубе при резонансной частоте возбуждения.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования проведены на экспериментальной установке (рис. 1), основанной на комплексе оборудования TV51075, который представляет собой виброгенератор S511 с усилителем мощности марки ВАА 120 (TIRA) [19]. В основании вертикальной трубы с внутренним радиусом  $R = 0.01825$  м колебался по гармоническому закону поршень, который приводился в движение виброгенератором. Противоположный конец трубы герметично был закрыт плоской крышкой. Длина закрытой трубы составляла  $L = 1.06$  м. Управление вибростендом и



**Рис. 1.** Экспериментальная установка: 1 – виброгенератор, 2 – поршень, 3 – датчик давления, 4 – трехканальный мостовой усилитель, 5 – осциллограф, 6 – лазер, 7 – труба, 8 – крышка, 9 – датчик люксметра, 10 – поршень, 11 – акселерометр.

контроль задаваемых параметров осуществлялись через компьютер посредством ИЕPE-акселерометра марки 4513-001 (Brüel & Kjær) и контроллера типа VR8500-1 (Vibration Research Corp.). Давление газа у поршня измерялось пьезоэлектрическим датчиком модели 8530C-15 (ENDEVCO). Сигнал с датчика через трехканальный мостовой усилитель напряжения модели 136 (ENDEVCO) подавался на цифровой осциллограф TDS3012C (Tektronix). Частоты и амплитуды колебаний поршня задавались с точностью до  $10^{-3}$  Гц и  $10^{-5}$  м соответственно. Погрешность датчика для измерения амплитуды колебаний давления среды составляла 0.2%. Диаметр частиц полидисперсного аэрозоля – 1–10 мкм. Распределение частиц рассматриваемого табачного дыма по размерам получено с помощью лазерного спектрометра LAP-320 фирмы “TOPAS” [17]. Начальная концентрация аэрозоля в трубе –  $1.35 \times 10^9 \text{ см}^{-3}$  [5], что соответствует малым объемному  $\alpha = 6.8 \times 10^{-5}$  и массовому  $m = 0.034$  содержаниям частиц [1]. Осаждение табачного дыма исследовалось с помощью системы, включающей лазер SYD1230 с длиной волны 650 нм и цифровой люксметр марки АТТ-1505 (Актаком). Лазерный луч направлялся перпендикулярно оси трубы, проходил через дым и попадал на светочувствительный датчик люксметра. В результате, исходя из данных показаний люксметра, определялось время осаждения дыма [17]. Полученные с

погрешностью 4% показания датчика люксметра переводились в значения концентрации частиц дыма. Для оценки числовой концентрации аэрозоля можно воспользоваться соотношением [18]

$$N = N_0 \frac{E_t - E_0}{E_1 - E_0},$$

где  $E_1$  – значения освещенности с датчика люксметра после полного заполнения трубы аэрозолем,  $E_0$  – показание люксметра до заполнения трубы,  $E_t$  – показания датчика в момент времени  $t$ . Расширенная неопределенность результатов измерений освещенности прибором  $u_L = 5.15\%$  и датчика давления  $u_p = 0.26\%$  с учетом случайных и систематических погрешностей для коэффициента охвата  $k = 2$  (доверительная вероятность  $P = 0.95$ ). Эксперименты проводились при нормальных условиях и температуре окружающего воздуха 296.5 К.

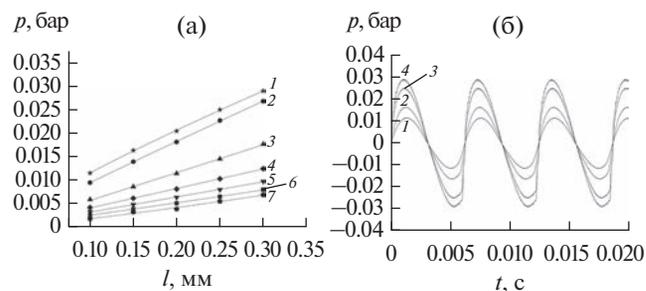
Труба считается узкой при выполнении критерия  $R \ll 0.61\lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны [20]. Для условий эксперимента вблизи первой резонансной частоты колебаний газа критерий выполняется.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимости амплитуды колебаний давления газа  $p$  от амплитуды колебаний поршня  $l$  при различных частотах возбуждения представлены на рис. 2. Наблюдаемая первая резонансная частота газа в трубе  $f = 160.66$  Гц. Зависимость  $p(l)$  описывается степенным законом (рис. 2а) [16]

$$p = Al^n, \quad (1)$$

где коэффициенты  $A$  и  $n$  для разных значений частот представлены в таблице. Вдали от резонансной частоты при 3.34 Гц и более наблюдается линейная зависимость  $p(l)$ , о чем свидетельствует показатель степени  $n = 1$ . Вблизи резонанса, где  $0.5 < n < 1$ , кривые становятся нелинейными. Стоит отметить асимметричность переднего и заднего фронтов волны давления на осциллограммах (рис. 2б). С ростом интенсивности колебаний рас-



**Рис. 2.** Зависимости  $p$  от  $l$  вблизи поршня (а) при различных частотах: 1 – 160.66 Гц, 2 – 162, 3 – 164, 4 – 166, 5 – 168, 6 – 170, 7 – 172; осциллограммы колебаний давления газа при резонансе (б): 1 – 0.1 мм, 2 – 0.15, 3 – 0.25, 4 – 0.3.

Коэффициенты в формуле (1) и значения  $SPL$  при  $l = 0.3$  мм

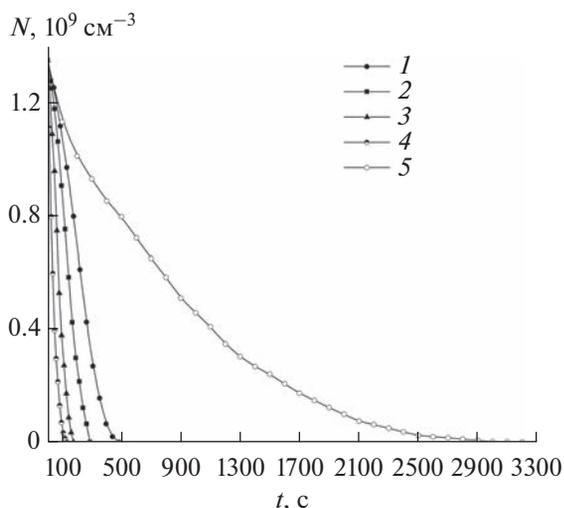
$f$ , Гц	160.66	162	164	168	172
$A$ , бар/мм	0.08	0.084	0.06	0.032	0.028
$n$	0.84	0.95	1	1	1
$SPL$ , дБ	163.24	162.55	158.95	153.75	150.74

тет крутизна переднего фронта, что свидетельствует о близости к ударно-волновому режиму колебаний.

На рис. 3 представлены зависимости числовой концентрации частиц дыма от времени при колебаниях газа с резонансной частотой. В закрытой трубе при наличии колебаний наблюдается ускоренное осаждение дыма, которое происходит более эффективно с увеличением амплитуды смещения поршня. Возрастание  $l$  от 0.1 до 0.3 мм ведет к росту уровня звукового давления ( $SPL$ ) от 155 до 163 дБ. Уровень звукового давления определяется формулой [15]

$$SPL = 20 \lg \frac{p}{p_0},$$

где  $p_0$  – исходное давление (порог слышимости), равное  $2 \times 10^{-10}$  бар. Удаление от резонанса ведет к уменьшению акустического давления до 150 дБ (таблица). В работах [14, 15] экспериментально доказана эффективность акустической агломерации уже при 130 дБ: этот процесс применялся в качестве предварительной обработки частиц золы для их последующего удаления. В режиме перехода к ударным волнам при  $SPL = 164.85$  дБ, ре-



**Рис. 3.** Зависимости числовой концентрации частиц табачного дыма от времени при резонансной частоте  $f = 160.66$  Гц: точки – экспериментальные результаты, сплошные линии – аппроксимации сплайнами; 1 – 0.1 мм, 2 – 0.15, 3 – 0.25, 4 – 0.3, 5 – естественное осаждение.

зонансной частоте и  $l = 0.3$  мм осаждение дыма происходит в 1.9 раза быстрее [16] по сравнению с результатами данной работы.

При максимальной амплитуде возбуждения  $l = 0.3$  мм осаждение дыма протекает за 132 с, что в 24 раза меньше времени естественного осаждения. Ускорение процесса осаждения объясняется тем, что при резонансной частоте возникают акустические течения в виде двух тороидальных вихрей в ядре потока, которые вовлекают частицы дыма в движение, что приводит к последующему осаждению частиц на стенках [11, 18, 21]. Поскольку скорость акустических течений пропорциональна квадрату амплитуды скорости газа в акустической волне [22–24], снижение амплитуды колебаний и величины  $SPL$  приводит к уменьшению скорости вихрей, что, соответственно, проявляется в увеличении времени осаждения до 484 с при  $l = 0.1$  мм.

Известно, что для различных по размеру частиц благоприятными являются определенные параметры акустического воздействия: диапазон частот, уровень звукового давления [4]. Исследование акустической агломерации частиц размерами до 10 мкм показало, что более эффективное удаление частиц происходит при частотах 1.2–1.4 кГц и 2.4 кГц в сравнении с частотами 1, 2 кГц [14]. Однако полученные результаты (рис. 3) показывают, что и при более низких резонансных частотах осаждение частиц дыма является эффективным процессом [16, 17].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены исследования колебаний газа с первой резонансной частотой и осаждения дыма в узкой закрытой трубе. Выявлены увеличение амплитуды колебаний давления газа и рост крутизны переднего фронта волны давления с возрастанием амплитуды колебаний поршня. С приближением к резонансу наблюдается увеличение уровня звукового давления до 163 дБ. Показано уменьшение числовой концентрации частиц дыма в трубе со временем для всех исследуемых амплитуд колебаний в резонансном режиме. Осаждение частиц дыма при резонансной частоте колебаний и  $l = 0.3$  мм происходит быстрее в 3.6 раза, чем при  $l = 0.1$  мм, и в 24 раза по сравнению с естественным осаждением.

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987. Т. 1. 464 с.
2. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Нелинейная волновая механика и технологии. Волновые и колеба-

- тельные явления в основе высоких технологий. Изд. 2-е, доп. М.: Ин-т комп. иссл., 2011. 780 с.
3. *Ilgamov M.A., Zaripov R.G., Galiullin R.G., Repin V.B.* Nonlinear Oscillations of a Gas in a Tube // *Appl. Mech. Rev.* 1996. V. 49. № 3. P. 137.
  4. *Медников Е.П.* Акустическая коагуляция и осаждение аэрозолей. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 263 с.
  5. *Davies C.N.* Cigarette Smoke: Generation and Properties of the Aerosol // *J. Aerosol Sci.* 1988. V. 19. № 4. P. 463.
  6. *Гуляев А.М., Кузнецов В.М.* Коагуляция аэрозолей под действием периодических ударных волн // *Акуст. журн.* 1962. Т. 8. № 4. С. 473.
  7. *Shuster K., Fichman M., Goldshtein A., Gutfinger C.* Agglomeration of Submicrometer Particles in Weak Periodic Shock Waves // *Phys. Fluids.* 2002. V. 14. № 5. P. 1802.
  8. *Вараксин А.Ю.* Двухфазные потоки с твердыми частицами, каплями и пузырями: проблемы и результаты исследований // *ТВТ.* 2020. Т. 58. № 4. С. 646.
  9. *Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Осипов П.П., Ткаченко Л.А., Шайдуллин Л.Р.* Волновая динамика газозвесей и отдельных частиц при резонансных колебаниях // *ТВТ.* 2021. Т. 59. № 3. С. 443.
  10. *Ran W., Saylor J.R.* The Directional Sensitivity of the Acoustic Radiation Force to Particle Diameter // *J. Acoust. Soc. Am.* 2015. V. 137. № 6. P. 3288.
  11. *Merrell T.M., Saylor J.R.* Demisting Using an Ultrasonic Standing Wave Field // *J. Acoust. Soc. Am.* 2017. V. 141. № 1. P. 172.
  12. *Qiao Z., Pan X., Liang S. et al.* Particulate Aggregation Through a Modulated Annular One-dimensional Acoustic Field at Resonant Frequencies // *Particology.* 2021. V. 57. P. 82.
  13. *Li K., Wang E., Wang Q. et al.* Improving the Removal of Inhalable Particles by Combining Flue Gas Condensation and Acoustic Agglomeration // *J. Cleaner Prod.* 2020. V. 261. 121270.
  14. *Liu J.Z., Zhang G.X., Zhou J.H. et al.* Experimental Study of Acoustic Agglomeration of Coal-fired Fly Ash Particles at Low Frequencies // *Powder Technology.* 2009. V. 193. P. 20.
  15. *Zhou D., Luo Z., Jiang J. et al.* Experimental Study on Improving the Efficiency of Dust Removers by Using Acoustic Agglomeration as Pretreatment // *Powder Technology.* 2016. V. 289. P. 52.
  16. *Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Ткаченко Л.А., Шайдуллин Л.Р.* Экспериментальное исследование коагуляции и осаждения газозвесей в закрытой трубе при переходе к ударно-волновому режиму // *ТВТ.* 2017. Т. 55. № 3. С. 484.
  17. *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. № 1. P. EL30.
  18. *Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Ткаченко Л.А., Шайдуллин Л.Р.* Динамика табачного дыма при резонансных колебаниях в закрытой трубе // *ТВТ.* 2019. Т. 57. № 2. С. 312.
  19. *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.
  20. *Исакович М. А.* Общая акустика. М.: Наука, 1973. 496 с.
  21. *Ниборг В.* Акустические течения. Физическая акустика. Т. 2 / Под ред. Мэзон У. М.: Мир, 1969. С. 302.
  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.* Акустические течения при резонансных колебаниях газа в цилиндрической трубе // *Акуст. журнал.* 2001. Т. 47. № 5. С. 611.
  24. *Hamilton M.F., Ilinskii Y.A., Zabolotskaya E.A.* Thermal Effects on Acoustic Streaming in Standing Waves // *J. Acoust. Soc. Am.* 2003. V. 114. P. 3092.