

УДК 532.529:534.2

ВЛИЯНИЕ КОНУСНОЙ НАСАДКИ НА ОСАЖДЕНИЕ АЭРОЗОЛЯ ПРИ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЯХ МАЛОЙ АМПЛИТУДЫ В ТРУБЕ

© 2023 г. Л. Р. Шайдуллин^{а,*}, С. А. Фадеев^{а,**}

^аФИЦ “Казанский научный центр” РАН, Институт механики и машиностроения, Казань, Россия

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

**E-mail: fadееv.sergei@mail.ru

Поступила в редакцию 17.03.2023 г.

После доработки 29.04.2023 г.

Принята к публикации 06.06.2023 г.

Экспериментально исследовано воздействие на аэрозоль слабоинтенсивных акустических колебаний в однородной трубе и в трубе с конусной насадкой в условиях равенства объемов резонаторов. Показано, что форма резонатора влияет на интенсивность, форму волны давления и спектр колебаний при постоянных значениях резонансной частоты и амплитуды смещения поршня. Наблюдается увеличение добротности резонатора с конусной насадкой. Выявлено ускоренное осаждение аэрозоля в трубах при акустических колебаниях на резонансной частоте. При наличии конусной насадки уменьшение концентрации капель аэрозоля происходит быстрее в 1.2 раза в отличие от однородной трубы и в 3 раза в сравнении с естественным осаждением. Полученные результаты могут быть использованы для повышения эффективности акустических методов очистки газов от дисперсной фазы.

Ключевые слова: акустические колебания, аэрозоль, резонатор, труба, осаждение, конусная насадка

DOI: 10.31857/S1024708423600124, **EDN:** XCQVVH

В настоящее время сохраняется интерес к нелинейным волновым процессам, которые широко применяются в разных областях науки и техники [1–3]. Данные процессы были рассмотрены для акустических резонаторов с различной геометрией [4–10]. Изучены оптимальные формы резонаторов для увеличения амплитуды акустического давления при наличии диссипации энергии в пограничном слое [5]. Для различных геометрий резонатора в виде конуса, конуса с горлом и колбы получены амплитуды давления, сильно превышающие амплитуды, полученные в цилиндрическом резонаторе [11]. Результаты решения одномерных нелинейных уравнений показали, что в конических и косинусоидальных трубках индуцируются высокие акустические давления в безударно-волновом режиме колебаний, когда в цилиндрической трубе равной длины и объема наблюдаются ударные волны [12]. При этом нелинейные характеристики акустического давления сильно зависят как от формы трубы, так и от амплитуды ускорения. В работе [6] рассматривается влияние нелинейности и геометрии на колебательное движение газа при резонансных колебаниях в усеченном конусе. Получено уравнение с собственными значениями, соответствующее переменной равновесной плотности и проведено сравнение с точными численными решениями. Особый интерес представляют цилиндрические резонаторы в виде трубы с изменяющимся сечением [11, 13–17]. Исследования колебаний газа в таких резонаторах выявили искажение формы волны, дисперсию резонансной частоты [13, 17] и появление сильных нелинейностей [15] в сравнении с цилиндрическими трубами постоянного радиуса. Полученные результаты применимы при разработке оптимальных форм труб для звукового компрессора, насосов или выявления эффективных способов акустического осаждения аэрозолей в пыле-каплеуловительных устройствах. Установлено, что при акустическом воздействии на туманы происходит ускорение процессов испарения, конденсации и дегазации капель. В случае увлажнения дыма и пылей осуществляется подсушка твердой дисперсной фазы. Рассмотренные процессы оказывают влияние на кинетику осаждения и агрегирования аэрозольных частиц [18–20]. Для улавливания аэрозолей и очистки от примесей применяют различные газоочистные оборудования, где

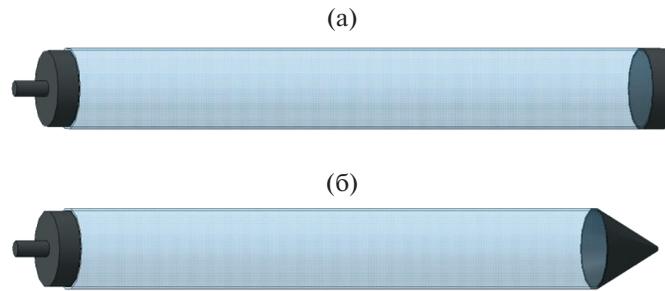


Рис. 1. Виды резонаторов: однородная труба (а), труба с конусной насадкой (б).

особое внимание уделяется интенсификации осаждения мелкодисперсных частиц аэрозоля [21]. Физическое воздействие в виде акустических полей с подобранными параметрами и геометрией резонаторов для увеличения интенсивности колебаний существенно влияет на движение дисперсной фазы [18, 22–24]. Образующиеся при этом вихревые акустические течения приводят к повышению вероятности сближения частиц и их осаждения на стенках резонатора [25, 26].

Результаты исследования волновых процессов в газах и аэрозолях представляют большой практический интерес при решении проблем сепарации конденсата из природных газов, сушке порошков, мониторинге окружающей среды или предварительной фильтрации взвешенных частиц. Помимо этого, аэрозоль в малых концентрациях может быть использован в качестве трассеров для визуализации и изучения вторичных акустических течений в резонаторах оптическими методами измерения мгновенных полей скорости газа [27]. Акустические методы очистки воздуха используются в качестве вспомогательных технических решений для предварительной обработки воздуха с целью повышения эффективности удаления дисперсной фазы в традиционных системах очистки газов [18, 19, 25]. Дальнейшее изучение динамики аэрозолей в резонаторах сложной формы призвано стимулировать развитие волновых технологий для промышленной экологии.

В настоящей работе исследуется влияние конусной насадки на осаждение мелкодисперсного аэрозоля и динамику газа при акустических колебаниях малой амплитуды в трубе.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Исследования проведены на экспериментальной установке TV51075, которая представляет собой виброгенератор S511 с усилителем мощности марки ВАА 120 фирмы TIRA [28]. На столе вибростенда при помощи специальной системы устанавливался плоский поршень из легкого прочного сплава Д16Т, который колебался в цилиндре соединенного с прозрачной, вертикально ориентированной, стеклянной трубой радиусом $R = 0.018$ м. Радиус трубы равен радиусу поршня и цилиндра. Противоположный конец трубы герметично закрывался плоской крышкой, расположенной перпендикулярно оси трубы (однородная труба), или крышкой в виде полого симметричного конуса с радиусом основания, равным радиусу трубы (труба с конусной насадкой). Геометрия исследуемых резонаторов представлена на рис. 1. Длина однородной трубы $L_1 = 0.51$ м (рис. 1а), длина трубы с конусной насадкой (рис. 1б) состоит из длины цилиндрической части $l = 0.498$ м и конуса с высотой $d = 0.036$ м; следовательно, расстояние от поршня до вершины конуса составляет $L_c = l + d = 0.534$ м. Для указанных геометрических параметров трубы с конусной насадкой системой-аналогом является однородная труба с приведенной длиной [3, 29], определяемой выражением, выведенным из равенства объемов

$$L_n = l + l_m, \quad l_m = \frac{d}{3}$$

где l_m – отношение объема конуса к площади поперечного сечения трубы. Учитывая поправку l_m , длина приведенной трубы $L_n = 0.51$ м. Таким образом, геометрические параметры исследуемых труб выбраны исходя из равенства объемов резонаторов, что позволяет напрямую сравнивать основные характеристики колебательных систем.

Управление и контроль вибростендом осуществлялись исходя из данных IEPЕ акселерометра марки 4513–001 фирмы Bruel & Kjaer и контроллера типа VR8500-1 фирмы Vibration Research

Corporation, через специальное программное обеспечение SineVIEW. Система управления выполняла спектральный анализ на базе быстрого преобразования Фурье полученных параметров и работала как система с обратной связью. Избыточное давление среды p измерялось пьезоэлектрическим датчиком модели 8530С-15 фирмы ENDEVCO вблизи поршня. Сигнал с датчика через трехканальный мостовой усилитель напряжения модели 136 фирмы ENDEVCO подавался на цифровой осциллограф TDS3012С фирмы Tektronix. Эксперименты проводились в воздухе при атмосферном давлении $p_0 = 102.5 \times 10^3$ Па и температуре $T_0 = 291$ К.

В качестве рабочей среды использовался аэрозоль, который создавался при помощи аэрозольного генератора АТМ 225 TOPAS из жидкости DEHS [20, 23]. Измерения с помощью лазерного спектрометра LAP-320 фирмы TOPAS показали, что радиус капель аэрозоля составляют от 0.42 до 0.53 мкм, что достигается благодаря высокоэффективному НЕРА фильтру на выходе генератора. Спектрометр реализовывал принцип количественной регистрации интенсивности света, рассеянного одной каплей, зависящей от первоначальной интенсивности. Размер среднего и наибольшего количества полученных капель, согласно интегральному распределению частиц, $r = 0.43$ мкм [30]. Это позволяет рассматривать аэрозоль как монодисперсную систему. Аэрозоль равномерно заполнял резонатор без избыточного давления. Время заполнения резонатора было одинаковым для каждого эксперимента, при постоянном расходе аэрозольного генератора. Начальная числовая концентрация аэрозоля для каждого случая равнялась $n_0 = 6.4 \times 10^{12}$ м⁻³. Полученная концентрация соответствует малым объемному и массовому содержаниям капель аэрозоля в резонаторах $\alpha = 2.17 \times 10^{-7}$, $m = 0.16 \times 10^{-3}$, соответственно, определяемых следующими выражениями [31]

$$\alpha = \frac{4}{3} \pi r^3 n_0, \quad m = \frac{\alpha \rho_a}{(1 - \alpha) \rho_g} \quad (1.1)$$

где ρ_0 – плотность несущей фазы (газа), ρ_a – плотность дисперсной фазы (DEHS). Скорость звука в такой разреженной системе ($\alpha \ll 1$, $m \ll 1$) слабо отличается от скорости звука в чистом газе. Выражения (1.1) справедливы для случая монодисперсной системы, когда дисперсная фаза в каждом элементарном объеме представляет собой сферическую частицу, что дает возможность пренебречь эффектами взаимодействия частиц.

Осаждение аэрозоля, которое проявляется в просветлении трубы под действием акустических колебаний со временем, определялось с помощью лазера (SYD1230) с длиной волны 650 нм и мощностью 5 мВт. Луч света падал перпендикулярно оси через середину трубы на датчик (фотодиод) люксметра марки АТТ-1505 (Актаком), время замера значений датчиком равняется 0.4 с с точностью до 4%. Для оценки числовой концентрации аэрозоля можно воспользоваться соотношением, учитывающим показания люксметра и начальную концентрацию [28]

$$N = n_0 \frac{E_t - E_0}{E_1 - E_0}$$

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 . При этом коэффициент пропускания среды $\tau = \Phi_1 / \Phi_0$ для светового потока без аэрозоля Φ_0 и с аэрозолем Φ_1 падающего на датчик люксметра равен 0.52 [32].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2, 3 представлены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) и осциллограммы колебаний давления газа для однородной трубы и трубы с конусной насадкой при амплитуде смещения поршня $l_0 = 0.05$ мм. Амплитуда колебаний давления максимальна на резонансной частоте $f_t = f_c = 334.5$ Гц, одинаковой для обоих случаев в силу равенства объемов резонаторов. Наблюдается несимметричный вид зависимостей $p(f)$ относительно резонансной частоты. В первом случае амплитуда колебаний давления на резонансной частоте $p_{\max} = 406.5$ Па, во втором 512.4 Па. Измеренные значения интерполированы полиномиальными зависимостями типа

$$p = C_0 + C_1 f + C_2 f^2 + \dots + C_k f^k$$

где коэффициенты полиномов C_k представлены в табл. 1.

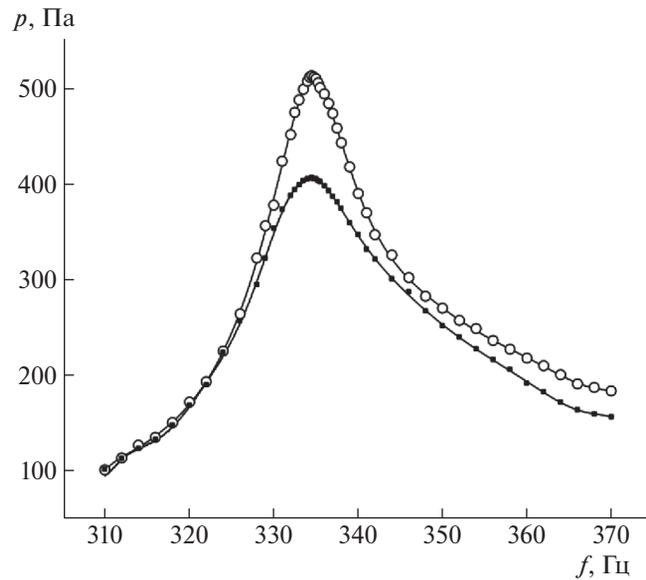


Рис. 2. Зависимость амплитуды колебаний давления газа от частоты: ■ — однородная труба; о — труба с конусной насадкой; линии — полиномиальная аппроксимация.

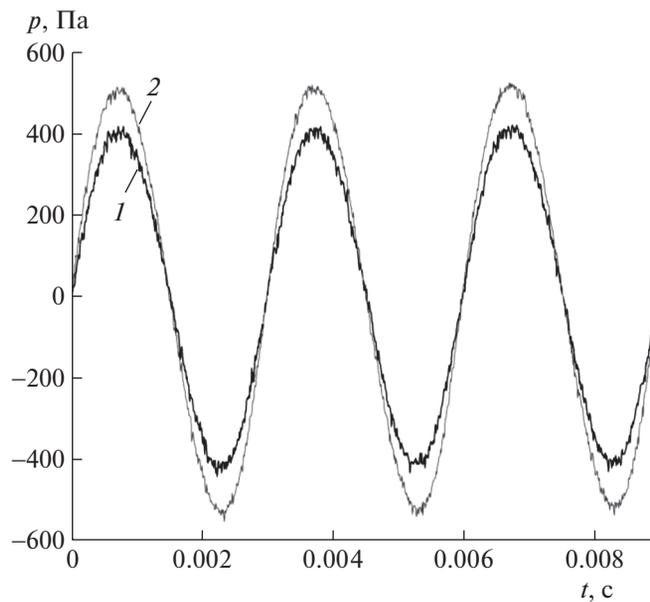


Рис. 3. Осциллограммы колебаний в однородной трубе (1) и в трубе с конусной насадкой (2).

При наличии конусной насадки в трубе наблюдаются увеличение амплитуды колебаний давления на 26% в сравнении с однородной трубой и сильное различие добротностей. Оценим добротность по формуле [33]

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f}$$

где f_0 — резонансная частота, $\Delta f = f_1 - f_2$ — ширина полосы пропускания, f_1, f_2 — нижняя и верхняя границы полосы пропускания, определяемые амплитудой колебаний давления $p_{\max}/\sqrt{2}$.

Для случая однородной трубы добротность составляет $Q = 18.57$, для трубы с конусной насадкой 27.83. Таким образом, добротность трубы с конусной насадкой на 50% выше добротности од-

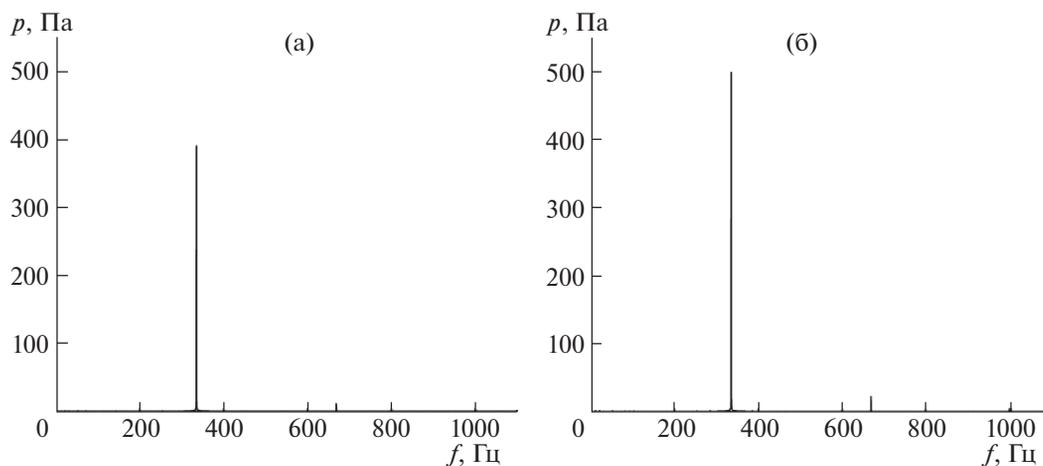
Таблица 1. Коэффициенты полиномиальной аппроксимации зависимостей $p(f)$

Коэф.	Однородная труба		Труба с конусной насадкой	
	$f \leq f_0$	$f \geq f_0$	$f \leq f_0$	$f \geq f_0$
C_0	5.86×10^{13}	-3.39×10^{12}	-1.06×10^{13}	-4.98×10^{12}
C_1	-1.46×10^{12}	7.68×10^{10}	2.65×10^{11}	1.12×10^{11}
C_2	1.58×10^{10}	-7.62×10^8	-2.88×10^9	-1.11×10^9
C_3	-9.85×10^7	4.32×10^6	1.8×10^7	6.27×10^6
C_4	3.83×10^5	-1.53×10^4	-6.99×10^4	-2.21×10^4
C_5	-9.51×10^2	34.66	174.17	49.93
C_6	1.48	-4.9×10^{-2}	-0.27	-7×10^{-2}
C_7	-1.31×10^{-3}	3.97×10^{-5}	2.41×10^{-4}	5.68×10^{-5}
C_8	5.09×10^{-7}	-1.41×10^{-8}	-9.39×10^{-8}	-2×10^{-8}

нородной трубы в условиях равенства объемов. Дальнейшее увеличение длины конусной насадки приведет к разнонаправленной динамике амплитуды давления на поршне и закрытом конце [29]. Так, амплитуда давления на поршне будет уменьшаться, в вершине конусной насадки будет наблюдаться повышение амплитуды давления.

На осциллограммах наблюдается слабая нелинейность – асимметричность переднего и заднего фронтов волны давления. Для однородной трубы на резонансной частоте длительность переднего фронта равна 1.44 мс, заднего 1.57 мс, для трубы с конусной насадкой 1.35 и 1.63 мс соответственно. В процессе распространения акустическая волна, возбуждаемая синусоидально колеблющимся поршнем, постепенно стремится превратиться из синусоидальной в пилообразную. Это обусловлено тем, что при сравнительно больших амплитудах колебаний давления газа различные части волны движутся с разной скоростью. Участки повышенного давления, где частицы среды движутся в направлении распространения волны, перемещаются с увеличенной скоростью, и, наоборот, участки пониженного давления, где частицы движутся в обратном направлении, перемещаются с пониженной скоростью [18]. Таким образом, в трубе с конусной насадкой, с увеличением амплитуды колебаний давления, уменьшается длительность переднего фронта и профиль волны становится более крутым по сравнению с однородной трубой (рис. 3), а в спектре наиболее ярко выражены высшие гармоники (рис. 4).

На рис. 5 приведены экспериментальные результаты зависимости давления газа от амплитуды смещения поршня. Видно, что с ростом амплитуды смещения поршня давление увеличива-

**Рис. 4.** Спектр акустических колебаний при $l_0 = 0.05$ мм: однородная труба (а), труба с конусной насадкой (б).

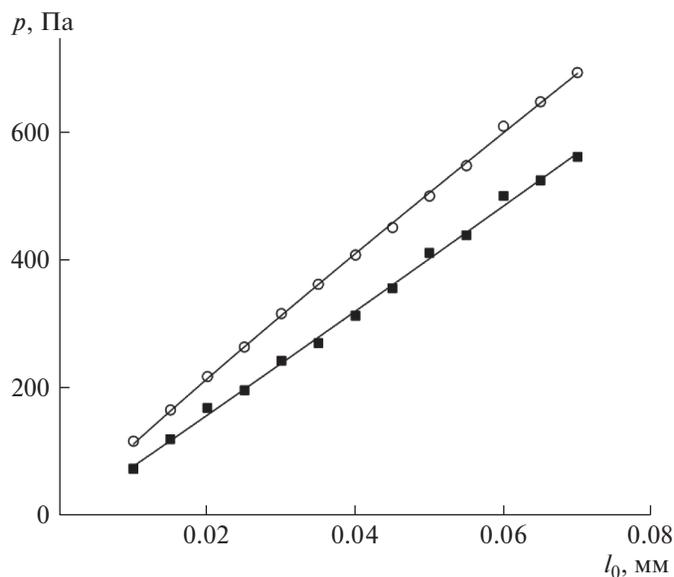


Рис. 5. Зависимость давления p от амплитуды смещения поршня l_0 на резонансной частоте колебаний газа: ■ – однородная труба; ○ – труба с конусной насадкой; линии – степенная аппроксимация.

ется. Как известно, амплитуда колебаний давления пропорциональна величине l_0^n ($n > 0$), которая характеризует интенсивность колебаний [8]. Аппроксимация полученных экспериментальных данных дает степенную зависимость

$$p = al_0^n$$

Коэффициенты аппроксимации представлены в табл. 2. Отметим, что показатели степени n близки к 1, что говорит о безударно-волновом режиме колебаний для обоих случаев геометрии закрытого конца.

Количественные данные по осаждению аэрозоля приведены на рис. 6. Показано монотонное уменьшение числовой концентрации капель аэрозоля от начального значения до полного осаждения на стенках резонатора со временем при амплитуде смещения поршня $l_0 = 0.05$ мм на резонансной частоте колебаний. Время полного осаждения аэрозоля для однородной трубы и трубы с конусной насадкой равны $t_1 = 680$ с и $t_2 = 816$ с соответственно. Время естественного осаждения аэрозоля при отсутствии колебаний $t_0 = 2016$ с.

Приведем теоретические оценки гравитационного и диффузионного осаждения в отсутствие колебаний газа. Предполагается, что размеры частиц r и его концентрация n_0 малы, поэтому взаимодействие между частицами незначительно.

Скорость движения частиц под действием сил тяжести, Стокса и Архимеда, известная как скорость осаждения частиц, определяется по формуле [34]

$$v_s = \frac{2r^2(\rho_a - \rho_0)}{9\mu} \quad (2.1)$$

где μ – динамическая вязкость газа. Расчет по (2.1) дает $v_s = 2 \times 10^{-5}$ м/с.

Таблица 2. Коэффициенты степенной аппроксимации зависимостей $p(l)$

Коэф.	Однородная труба	Труба с конусной насадкой
a	8578	8300
n	1	0.93

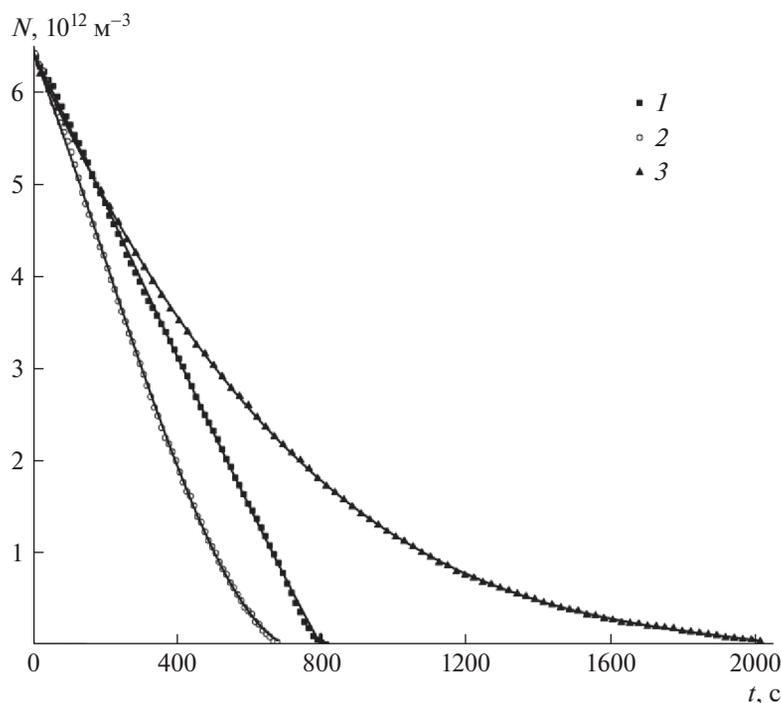


Рис. 6. Зависимости концентрации частиц аэрозоля от времени в однородной трубе (1), в трубе с конусом (2) и при естественном осадении (3) при амплитуде смещения поршня $l_0 = 0.05$ мм. Линии — полиномиальная аппроксимация.

Для характеристики скорости диффузии частиц аэрозоля в результате теплового движения молекул при возникновении градиента концентрации у стенок необходимо определить коэффициент диффузии частиц, который рассчитывается по уравнению Стокса—Эйнштейна [35]

$$D = \frac{kT_0}{6\pi\mu r}$$

где k — постоянная Больцмана. Для параметров эксперимента $D = 2.73 \times 10^{-11}$ м²/с.

Механизм движения частиц характеризуется числом Пекле [36, 37]

$$Pe = \frac{v_s r}{D}$$

Если $Pe \gg 1$, то броуновским движением частиц аэрозоля можно пренебречь; при $Pe \ll 1$ осаждение является диффузионным. Стоит отметить, что аналитические [34, 38] и численные [37] расчеты показывают, что для аэрозольных частиц радиуса 0.3–0.5 мкм скорости гравитационного и диффузионного осаждения имеют один и тот же порядок величины. Для частиц аэрозоля, используемого в эксперименте, число $Pe = 0.31$, откуда следует, что с учетом геометрических размеров ($L \gg R$) и вертикальной ориентации трубы диффузионное осаждение превалирует над гравитационным.

Выявлено, что осаждение для трубы с конусной насадкой происходит в 1.2 раза быстрее в сравнении с однородной трубой, и в 3 раза быстрее, чем при естественном осадении. Частицы аэрозоля принимают участие в колебательном и поступательном движении газа, в том числе под действием эффектов второго порядка: асимметрия формы звуковой волны, акустические течения [18]. В данных режимах ускоренное осаждение частиц на стенках резонаторов в первую очередь вызвано акустическими течениями в виде двух тороидальных вихрей в ядре потока ($R - 4.6\delta$, где R — внутренний радиус трубы, δ — акустический пограничный слой [39]), возникающих в стоячей волне [18, 23, 40]. Наличие конуса ведет к увеличению интенсивности колебаний (рис. 2), что, соответственно, уменьшает время осаждения аэрозоля.

Таблица 3. Коэффициенты полиномиальной аппроксимации зависимостей $N(t)$

	Естественное ос.	Однородная труба	Труба с конусной насадкой
K_0	6.47	6.47	6.47
K_1	-0.008	-0.01	-0.008
K_2	4.1×10^{-6}	-8.1×10^{-6}	-1.2×10^{-6}
K_3	6.9×10^{-10}	1.3×10^{-8}	1.4×10^{-10}

Выражение для аппроксимации экспериментальных результатов имеет вид

$$N = K_0 + K_1 t + K_2 t^2 + K_3 t^3$$

где постоянные K_0, K_1, K_2, K_3 определены в диапазонах, представленных в табл. 3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально исследовано осаждение аэрозоля при нелинейных колебаниях в трубах с плоским и конусным окончаниями. Наличие конусной насадки, в сравнении с плоским окончанием, позволяет интенсифицировать колебания газа в трубе при равных амплитудах смещения поршня и резонансных частотах. В обоих случаях наблюдается слабая нелинейность, однако колебания сохраняют непрерывный, близкий к гармоническому, вид.

Спектр колебаний газа в трубе с конусной насадкой содержит ярко выраженные пики на удвоенной и утроенной резонансных частотах. При наличии конусной насадки в условиях безударно-волнового режима колебаний газа наблюдается ускоренное осаждение аэрозоля. Выявлено, что осаждение аэрозоля в трубе с конусной насадкой происходит в 1.2 раза быстрее в сравнении с однородной трубой и в 3 раза быстрее по сравнению с естественным осаждением.

Таким образом, конструкционное решение в виде конусного окончания резонансной трубы может быть использовано для повышения эффективности технологий очистки промышленных выбросов от дисперсных примесей.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00302, <https://rscf.ru/project/22-79-00302>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зарембо Л.К., Красильников В.А. Введение в нелинейную акустику. М.: Наука, 1966. 519 с.
2. Руденко О.В., Солуян С.И. Теоретические основы нелинейной акустики. М.: Наука, 1975. 287 с.
3. Skuchik E. *Osnovy akustiki [Fundamentals of acoustics]*: translated from English, edited by L.M. Lyamshev. V. 2. М.: Mir, 1976. 542 p.
4. Li X., Finkbeiner J., Raman G., Daniels C., Steinetz B.M. Optimized shapes of oscillating resonators for generating high-amplitude pressure waves // *J. Acoust. Soc. Am.* 2004. V. 116. № 5. P. 2814–2821.
5. Cervenka M., Soltés M., Bednarik M. Optimal shaping of acoustic resonators for the generation of high-amplitude standing waves // *J. Acoust. Soc. Am.* 2014. V. 136. № 3. P. 1003–1012.
6. Amundsen D.E., Mortell M.P., Seymour B.R. Resonant radial oscillations of an inhomogeneous gas in the frustum of a cone // *Z. Angew. Math. Phys.* 2015. V. 66. P. 2647–2663.
7. Antao D.S., Farouk B. High amplitude nonlinear acoustic wave driven flow fields in cylindrical and conical resonators // *J. Acoust. Soc. Am.* 2013. V. 134. № 2. P. 917–932.
8. Shaidullin L., Fadeev S. Acoustic gas oscillations in a cubic resonator with a throat under small perturbations // *Appl. Acoust.* 2022. V. 192. 108758.
9. Feng H., Peng Y., Bin G., Shen Y. Evolution of Flow and Streaming in Exponential Variable Cross-Section Resonators // *Appl. Sci.* 2020. V. 10 № 5. 1694.
10. Yanan Yu, Wei Liu, Wen He. A study on finite amplitude standing waves in stepped acoustic resonator // *Appl. Acoust.* 2023. V. 202. 109164.
11. Lawrenson C.C., Lipkens B., Lucas T.S., Perkins D.K., VanDoren T.W. Measurements of macrosonic standing waves in oscillating closed cavities // *J. Acoust. Soc. Am.* 1998. V. 104. № 2. P. 623–636.
12. 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. № 6. P. 2765–2774.

13. *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. № 1. P. 109–119.
14. *Kar T., Munjal M.L.* Analysis and design of conical concentric tube resonators // *J. Acoust. Soc. Am.* 2004. V. 116. № 1. P. 74–83.
15. *Min Q.* Generation of extremely nonlinear standing-wave field using loudspeaker-driven dissonant tube // *J. Acoust. Soc. Am.* 2018. V. 143. № 3. P. 1472–1476.
16. *Feng H., Peng Y., Zhang X., Li X.* Influence of tube geometry on the performance of standing-wave acoustic resonators // *J. Acoust. Soc. Am.* 2018. V. 144. № 3. P. 1443–1453.
17. *Mortell M.P., Seymour B.R.* Nonlinear resonant oscillations in closed tubes of variable cross-section // *J. Fluid Mech.* 2004. V. 519. P. 183–199.
18. *Mednikov E.P.* Acoustic Coagulation and Precipitation of Aerosols. N.-Y.: Springer, 1965. 180 p.
19. *Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Осипов П.П., Ткаченко Л.А., Шайдуллин Л.Р.* Волновая динамика газозвзвесей и отдельных частиц при резонансных колебаниях // *ТВТ.* 2021. Т. 59. № 3. С. 443–466.
20. *Yuen W.T., Fu S.C., Kwan J.K. C., Chao C.Y.H.* The use of nonlinear acoustics as an energy-efficient technique for aerosol removal // *Aerosol Sci. Technol.* 2014. V. 48. № 9. P. 907–915.
21. *Amiri M., Sadighzadeh A., Falamaki C.* Experimental parametric study of frequency and sound pressure level on the acoustic coagulation and precipitation of PM_{2.5} // *Aerosol Air Qual. Res.* 2016. V. 16. № 12. P. 3012–3025.
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. № 1. P. EL30–EL33.
23. *Gubaidullin D.A., Zaripov R.G., Tkachenko L.A., Shaidullin L.R.* Aerosol deposition on resonances at nonlinear oscillations in a closed cross section jump tube // *Continuum Mech. Thermodyn.* 2022.
24. *Argo T.F., Zadler B.J., Meegan G.D.* Size selection of levitated aerosol particulate in an ultrasonic field // *J. Acoust. Soc. Am.* 2020. V. 147. № 2. P. EL93.
25. *Хмелев В.Н., Голых Р.Н., Нестеров В.А., Боченков А.С., Шалунов А.В.* Компьютерное моделирование ультразвуковой агломерации субмикронных частиц с учетом вихревого движения несущей среды // *Южно-Сибирский научный вестник.* 2021. Вып. 5. № 39. С. 165–170.
26. *Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Ткаченко Л.А., Шайдуллин Л.Р.* Экспериментальное исследование осаждения аэрозоля в закрытой трубе с изменяющимся сечением // *ТВТ.* 2022. Т. 60. № 1. С. 146–148.
27. *Ellier S.E., Kdous W., Bailly Y., Girardot L., Ramel D., Nika P.* Acoustic streaming measurements in standing wave resonator using Particle Image Velocimetry // *Wave motion.* 2014. V. 51. № 8. 1288–1297.
28. *Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Ткаченко Л.А.* Резонансные колебания аэрозоля в трубе с диафрагмой в безударно-волновом режиме // *ТВТ.* 2014. Т. 52. № 6. С. 921–926.
29. *Gubaidullin D.A., Tkachenko L.A., Shaidullin L.R., Fadeev S.A.* Investigation of gas oscillations in the closed tube with a cone tip // *Lobachevskii J. Math.* 2022. V. 43. № 8. 1116–1121.
30. *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. 788–795.
31. *Нигматуллин Р.И.* Динамика многофазных сред. Т. 1. М.: Наука, 1987. 464 с.
32. *Гуревич М.М.* Фотометрия (теория, методы и приборы). Л: Энергоатомиздат, 1983. 272 с.
33. *Скучик Е.* Простые и сложные колебательные системы. М.: Мир, 1971. 557 с.
34. *Фукс Н.А.* Механика аэрозолей. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 352 с.
35. *Einstein A.* Investigation on the Theory of Brownian Movement, edited by R. Furth. New York: Dover, 1956.
36. *Desantes J.M., Margot X., Gil A., Fuentes E.* Computational study on the deposition of ultrafine particles from Diesel exhaust aerosol // *J. Aerosol Sci.* 2006 V. 37. P. 1750–1769.
37. *Wu S., Zhu H., Chen Y., Qi C. and Li G.* A 3D Monte Carlo Simulation for Aerosol Deposition onto Horizontal Surfaces by Combined Mechanisms of Brownian Diffusion and Gravity Sedimentation // *Atmosphere.* 2022. V. 13. 1408.
38. *Губайдуллин Д.А., Осипов П.П.* Аэрогидродинамика дисперсной частицы. М.: Физматлит, 2020. 176 с.
39. *Gubaidullin D.A., Tkachenko L.A., Fadeev S.A., Shaidullin L.R.* Resonance oscillations of gas in a closed tube in presence of a heterogeneous temperature profile // *Lobachevskii J. Math.* 2022. V. 43. № 8. P. 1110–1115.
40. *Hamilton M.F., Ilinskii Y.A., Zabolotskaya E.A.* Acoustic streaming generated by standing waves in two-dimensional channels of arbitrary width // *J. Acoust. Soc. Am.* 2003. V. 113. № 1. P. 153–160.