

УДК 532.529:534.2

ДИНАМИКА ТАБАЧНОГО ДЫМА ПРИ РЕЗОНАНСНЫХ КОЛЕБАНИЯХ В ЗАКРЫТОЙ ТРУБЕ

© 2019 г. Д. А. Губайдуллин^{1, 2, *}, Р. Г. Зарипов¹, Л. А. Ткаченко^{1, 2, **}, Л. Р. Шайдуллин^{1, 2}¹Институт механики и машиностроения ФИЦ КазНЦ РАН, Татарстан, г. Казань, Россия²Казанский (Приволжский) федеральный университет, Татарстан, г. Казань, Россия

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

**E-mail: luda_tkachenko@inbox.ru

Поступило в редакцию 23.03.2018 г.

После доработки 14.05.2018 г.

Принято к печати 10.10.2018 г.

Экспериментально изучена динамика табачного дыма при нелинейных колебаниях в закрытой трубе. Колебания полидисперсной газовзвеси на фундаментальной частоте возбуждаются плоским поршнем в режиме перехода к ударным волнам при помощи вибростенда. Изучено влияние амплитуды колебаний и высоты заполнения трубы табачным дымом на скорость его коагуляции и осаждения. Рассмотрены различные случаи заполнения трубы дымом: полностью, на три четверти, наполовину и на четверть. Концентрация табачного дыма монотонно уменьшается со временем, что связано с коагуляцией и осаждением его частиц. Этот процесс происходит в несколько сот раз быстрее, чем при естественном осаждении. Зависимость коагуляции и осаждения табачного дыма от высоты заполнения трубы имеет немонотонный характер с минимальным значением при заполнении трубы наполовину. Изменение амплитуды смещения поршня оказывает заметное влияние на скорость коагуляции и осаждения табачного дыма только при полном заполнении трубы. Это связано с формированием в трубе акустических течений в виде тороидальных вихрей.

DOI: 10.1134/S0040364419010125

ВВЕДЕНИЕ

Очистка воздуха от взвешенных в ней частиц часто рекомендуется в качестве отдельной или комплексной меры по контролю охраны окружающей среды. Одним из перспективных методов является акустическая коагуляция и осаждение дисперсных сред [1], что позволяет значительно повысить как качество улавливания пыли и дыма, так и энергоэффективность используемых для этого ресурсов. Изучение волновых процессов в дисперсных средах представляет собой одну из актуальных проблем механики. В [2] приведены основные теоретические модели волновой динамики многофазных сред и ряд результатов исследований в этой области. Основы теории нелинейных колебаний многофазных систем и волновых технологий представлены в [3]. Двухфазные течения с твердыми частицами, каплями и пузырями, а также механизмы образования областей повышенной концентрации дисперсной фазы в таких течениях изучены в [4–6]. В работах [7–14] экспериментально исследована динамика различных газовзвесей при нелинейных колебаниях в разных режимах вблизи резонансных частот в закрытой трубе. Вблизи резонансной частоты наблюдается ускоренная коагуляция капель машинного масла [7] (с размером частиц 1–10 мкм), капель

олеиновой кислоты [8] (1–10 мкм), частиц дыма [9] (0.3 мкм) и капель, получаемых из жидкости DEN8 [10–14] (0.83 мкм). Такой нелинейный эффект связан с вихреобразованием в среде.

В продолжение исследований [10–14] в настоящей работе изучаются особенности осаждения частиц газовзвесей в виде табачного дыма при нелинейных колебаниях на фундаментальной частоте в режиме перехода к ударным волнам в закрытой трубе с визуализацией движения среды.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты выполняются на установке, ранее использованной в исследованиях нелинейных колебаний мелкодисперсной газовзвеси [13, 14]. Основой установки является виброгенератор марки TIRAvib S 5220/LS с усилителем мощности ВАА 1000-ЕТ фирмы “Tiga”. На стол виброгенератора закрепляется плоский поршень, который совершает колебания в цилиндре, соединенном с вертикальной кварцевой трубой длиной $L = 0.938$ м и радиусом $R = 0.05$ м. Выбор длины и диаметра трубы позволяет реализовать режим перехода к ударным волнам при малых амплитудах смещения поршня, которые допускают технические па-

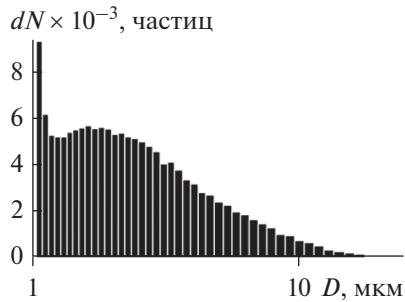


Рис. 1. Распределение частиц табачного дыма по геометрическому диаметру.

раметры используемого генератора колебаний. Пассивный конец трубы закрывается герметичной крышкой. Управление и контроль вибростендом осуществляется через компьютер посредством пьезоэлектрического IEPЕ-акселерометра марки 4513 фирмы “Bruel & Kjaer” и контроллера VR9500 фирмы “Vibration Research Corporation”. В качестве рабочей среды используется полидисперсная газовзвесь в виде табачного дыма. На рис. 1 представлено распределение частиц табачного дыма по геометрическому диаметру, которое фиксируется лазерным спектрометром LAP-320 фирмы “Tomas”. Видно, что диаметр частиц лежит в пределах от 1 до 20 мкм. Давление среды измеряется пьезоэлектрическим датчиком давления модели 8530С-15 фирмы “Bruel & Kjaer”, сигнал с которого подается на трехканальный мостовой усилитель напряжения ENDEVCO модель 136 фирмы “Bruel & Kjaer” и далее регистрируется на цифровом осциллографе модели DSO 3062A фирмы “Agilent Technologies”. Видеосъемка процесса осаждения табачного дыма ведется камерой Canon EOS 650D с объективом EF-S 18-55mm IS II Black, которая располагается на штативе, перпендикулярно трубе на расстоянии 0.5 м. Для получения четкой и контрастной картины за трубой устанавливается черный экран. В качестве измерительного фотоприемника светопроницаемости дыма используется люксметр марки АТТ-1505 фирмы “Актаком”. Источник света и оптическая система для формирования светового потока состоят из белого светодиода марки BL-L813 с дистанционным управлением и фокусирующей линзы. Свет проходит перпендикулярно сквозь дым в трубе и попадает в центр светочувствительного датчика люксметра. Данные с люксметра подаются на компьютер через интерфейс RS-232 и обрабатываются программой АТТ-1006.

Когда вынужденная частота смещений поршня совпадает с одной из собственных частот колебаний среды $\nu_n = n\nu_0$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) в ограниченном объеме, имеет место резонанс с увеличением

амплитуды колебаний. Собственные частоты зависят от формы и размера ограниченного объема и находятся из волнового уравнения. Первая ($n = 1$) собственная (фундаментальная) частота определяется выражением $\nu_0 = c_0/2L(1 + \beta')$, где $\beta' = (1/R\sqrt{2})[1 + (\kappa - 1)/\sqrt{Pr}] \sqrt{\mu/\rho_0} 2\pi\nu_0$ – коэффициент диссипации, μ – коэффициент динамической вязкости, ρ_0 – плотность невозмущенной среды, Pr – число Прандтля, c_0 – скорость звука, κ – показатель адиабаты. Для условий данного исследования $\nu_0 = 182$ Гц. Эксперименты выполняются на указанной частоте для различных амплитуд смещения поршня $l = 0.15, 0.25, 0.375$ мм и при разной высоте h заполнения трубы табачным дымом: полностью $h = 0.938$ м, на три четверти $h = 0.703$ м, наполовину $h = 0.469$ м и на четверть $h = 0.235$ м. Начальная числовая концентрация N_0 частиц табачного дыма во всех случаях равна 7×10^8 см⁻³. После заполнения трубы дымом записывается начальное показание люксметра Φ_1 . Далее с запуском колебаний концентрация газовой взвеси начинает уменьшаться и соответственно меняются показания люксметра Φ_t , которые фиксируются на компьютере. Эксперимент проводится до полного просветления дыма, и определяется показание люксметра Φ_0 , когда труба заполнена воздухом. Для расчета числовой концентрации аэрозоля из полученных данных используется соотношение [11]:

$$N = N_0 (\Phi_t - \Phi_0) / (\Phi_1 - \Phi_0) \text{ [см}^{-3}\text{]}. \quad (1)$$

В экспериментах одновременно с записью показаний люксметра ведется видеосъемка процесса осаждения табачного дыма. Аналогичные измерения проводятся в отсутствие колебаний для естественного осаждения табачного дыма.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2а представлены зависимости числовой концентрации частиц табачного дыма от времени при разной высоте заполнения им трубы. Во всех случаях концентрация дыма монотонно уменьшается. Экспериментальные данные можно аппроксимировать зависимостью

$$N = A_0 + A_1 e^{-Kt}, \quad (2)$$

где постоянные коэффициенты изменяются в следующих пределах: $9 < A_0 < 13$, $-5.7 < A_1 < -1.7$, $-0.115 < K < -0.088$. Из рис. 2а следует, что со временем происходит уменьшение числовой концентрации табачного дыма, связанное с процессом коагуляции и осаждения его частиц на поршне и на стенках трубы. На рис. 2б дана зависимость числовой концентрации частиц табачного дыма от времени при естественном осаждении.

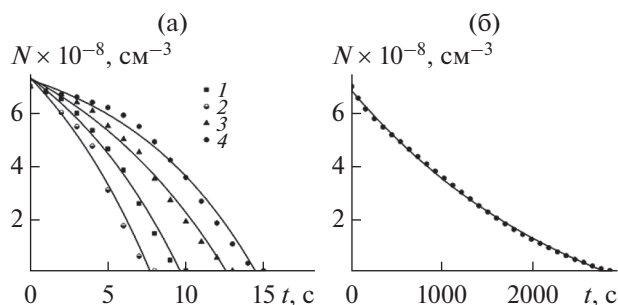


Рис. 2. Зависимости числовой концентрации частиц табачного дыма от времени на фундаментальной частоте колебаний (а) для амплитуды смещения поршня $l = 0.375$ мм при различных высотах заполнения в трубе: 1 – $h = 0.235$ м, 2 – 0.469, 3 – 0.703, 4 – 0.938; (б) – при отсутствии колебаний; сплошные линии – экспоненциальная аппроксимация.

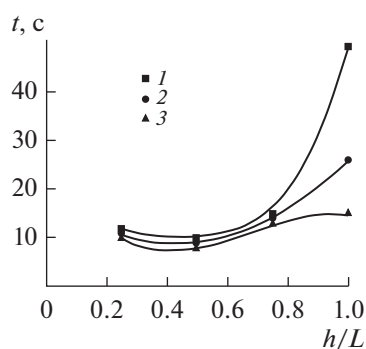


Рис. 3. Зависимости времени осаждения табачного дыма от высоты заполнения трубы на фундаментальной частоте колебаний: 1 – $l = 0.15$ мм, 2 – 0.25, 3 – 0.375, сплошные линии – полиномиальная аппроксимация.

Отметим, что, хотя данные также аппроксимируются экспонентой (2), коэффициенты имеют значения $A_0 = -3.4$, $A_1 = 10.3$, $K = 4 \times 10^{-4}$, отличные от полученных при возбуждении колебаний. Также видно, что наличие колебаний приводит к ускорению коагуляции и осаждения частиц в сотни раз.

По полученным данным определяется время осаждения частиц табачного дыма при различной высоте заполнения трубы для разных амплитуд смещения поршня на фундаментальной частоте колебаний (рис. 3). Наблюдается немонотонный характер зависимости времени осаждения дыма от высоты заполнения трубы для всех исследуемых амплитуд смещения поршня. Минимальное время во всех случаях соответствует заполнению трубы наполовину, чуть выше – заполнению трубы на четверть и три четверти, и максимальное – при полностью заполненной трубе. Так, например, для амплитуды смещения поршня $l = 0.375$ мм указанные времена равны 8, 10, 13 и 15 с соответственно.

Известно, что при колебаниях газа в закрытой трубе в резонансе образуется пара тороидальных вихрей в верхней и нижней половинах трубы соответственно [15]. Частицы табачного дыма участвуют в вихревом движении и через некоторое время осаждаются на поршне и на стенках трубы. Визуализация процесса показывает, что при заполнении трубы на четверть и три четверти происходит выброс частиц дыма в свободную от него часть трубы. В трубе, заполненной наполовину, на процесс коагуляции и осаждения дыма оказывает влияние только вихрь в нижней половине трубы, вследствие чего не возникают выбросы в свободную часть трубы. Когда труба заполнена полностью, на табачный дым действуют оба вихря в верхней и в нижней половинах трубы. При этом скорость коагуляции и осаждения дыма уменьшается, что связано с увеличением времени возмущения всего дыма, находящегося в данном объеме. Также можно отметить, что изменение амплитуды смещения поршня оказывает незначительное влияние на время осаждения дыма, частично заполняющего трубу. При увеличении амплитуды в 1.5 раза время осаждения уменьшается на 2 с, тогда как в полностью заполненной трубе при таких же изменениях амплитуды время осаждения изменяется практически вдвое.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате экспериментальных исследований нелинейных колебаний частиц табачного дыма в закрытой трубе выявлено уменьшение их числовой концентрации со временем на фундаментальной частоте. Показано, что наличие колебаний в режиме перехода к ударным волнам ускоряет процесс коагуляции и осаждения табачного дыма в сотни раз по сравнению с естественным осаждением. Обнаружена немонотонная зависимость времени коагуляции и осаждения табачного дыма от высоты заполнения им трубы с минимальным значением при заполнении трубы наполовину. Показано, что изменение амплитуды смещения поршня в исследуемом диапазоне оказывает незначительное влияние на время коагуляции и осаждения табачного дыма, частично заполняющего трубу, и существенное влияние при заполнении трубы полностью.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-11-10016).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Медников Е.П. Акустическая коагуляция и осаждение аэрозолей. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 263 с.
2. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Т. 1. М.: Наука, 1987. 464 с.
3. 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.
4. *Вараксин А.Ю.* Гидрогазодинамика и теплофизика двухфазных потоков: проблемы и достижения (обзор) // ТВТ. 2013. Т. 51. № 3. С. 421.
 5. *Вараксин А.Ю.* Кластеризация частиц в турбулентных и вихревых двухфазных потоках // ТВТ. 2014. Т. 52. № 5. С. 777.
 6. *Вараксин А.Ю.* Влияние частиц на турбулентность несущего потока газа // ТВТ. 2015. Т. 53. № 3. С. 441.
 7. *Гуляев А.М., Кузнецов В.М.* Коагуляция аэрозолей под действием периодических ударных волн // Акуст. журн. 1962. Т. 8. № 4. С. 473.
 8. *Temkin S.* Droplet Agglomeration Induced by Weak Shock Waves // Phys. Fluids. 1970. V. 13. P. 1639.
 9. *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.
 10. *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.
 11. *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.
 12. *Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Ткаченко Л.А.* Экспериментальное исследование колебаний аэрозоля в трубах в безударно-волновом режиме вблизи резонанса // Докл. РАН. 2013. Т. 452. № 2. С. 161.
 13. *Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Ткаченко Л.А., Шайдуллин Л.Р.* Экспериментальное исследование коагуляции и осаждения газозвеси в закрытой трубе при переходе к ударно-волновому режиму // ТВТ. 2017. Т. 55. № 3. С. 484.
 14. *Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Ткаченко Л.А.* Экспериментальное исследование резонансных колебаний аэрозоля в трубах в режиме перехода к ударным волнам // Докл. РАН. 2017. Т. 475. № 3. С. 273.
 15. *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.