

УДК 532.529:534.2

ОСАЖДЕНИЕ ДЫМА ПРИ НЕЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАНИЯХ В ОТКРЫТОЙ ТРУБЕ ВБЛИЗИ РЕЗОНАНСА

© 2019 г. Д. А. Губайдуллин¹ *, Р. Г. Зарипов¹, Л. А. Ткаченко¹ **, Л. Р. Шайдуллин¹

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

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

**E-mail: luda_tkachenko@inbox.ru

Поступило в редакцию 18.11.2018 г.

После доработки 15.02.2019 г.

Принято к публикации 27.03.2019 г.

Проведены экспериментальные исследования с визуализацией осаждения табачного дыма, заполняющего открытую трубу на различную высоту, при нелинейных колебаниях. Получены зависимости числовой концентрации частиц табачного дыма от времени при различных амплитудах смещения поршня на первой собственной частоте. Обнаружена немонотонная зависимость времени осаждения от высоты заполнения дымом трубы. С увеличением высоты заполнения время увеличивается, достигая максимума для трех четвертей трубы, затем снова уменьшается для полного заполнения трубы, что обусловлено выбросом дыма из верхней части трубы в окружающее пространство. Показано, что при наличии колебаний осаждение происходит значительно быстрее, чем при их отсутствии.

DOI: 10.1134/S0040364419040070

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время важной является проблема удаления взвешенных в воздухе мелкодисперсных включений промышленного происхождения, образовавшихся, например, при переработке различного сырья и обработке металлов, при процессах кислотного и щелочного травления, сжигании или измельчении твердых тел [1]. Современные устройства для очистки могут не улавливать дисперсные частицы микронных размеров. Воздействие акустической волны в ограниченных объемах, особенно вблизи резонансных частот, способствует не только ускоренному осаждению дисперсных включений на стенках, но и их укрупнению вследствие соударения между собой под действием волнового поля [2]. Ранее было проведено множество экспериментальных и теоретических исследований резонансных колебаний однородного газа и сопровождающих их нелинейных эффектов [3]. Обзоры экспериментальных и теоретических исследований двухфазных потоков с твердыми частицами, каплями и пузырями, основные характеристики двухфазных течений, а также особенности обтекания тел двухфазными (дисперсными) потоками рассмотрены в [4, 5]. В [6] даны основные уравнения механики для моделирования физических явлений в многофазных средах различной структуры, представлены экспериментальные методы и их результаты. Известны работы по осаждению частиц табачного дыма [7] и капель олеиновой кис-

лоты [8] с диаметрами 1–10 мкм, а также частиц, полученных от сгорания палки ладана [9], с диаметрами 0.3 мкм в закрытых трубах при нелинейных колебаниях в режиме образования ударных волн вблизи резонансных частот. В [10–15] исследовалась динамика аэрозоля, получаемого из жидкости DEHS с диаметром капель 0.863 мкм в трубах с различными условиями на концах в безударно-волновом режиме, при переходе к ударным волнам, а также при формировании ударных волн. Показано, что при воздействии акустических полей различной интенсивности на аэрозоль происходит его ускоренное осаждение по сравнению с естественным осаждением.

В данной работе изучается осаждение табачного дыма в частично заполненной открытой трубе при нелинейных резонансных колебаниях на первой собственной частоте в переходном режиме, когда ударные волны не образуются.

УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводились на установке, основным элементом которой являлся виброгенератор марки TIRAvib S 5220/LS с усилителем мощности BAA 1000-ET фирмы TIRA. На стол виброгенератора закреплялся плоский поршень диаметром $2R = 0.1$ м, который возбуждал колебания в вертикальной кварцевой трубе длиной $L = 0.918$ м. Выбор длины и диаметра трубы позво-

лял реализовать переходный режим, когда ударные волны не возникают, при малых амплитудах смещения поршня, которые допускают технические параметры используемого генератора колебаний. Уменьшение диаметра трубы приведет к увеличению диссипативных потерь на стенке трубы, что вызовет уменьшение амплитуды колебаний среды (безударно-волновой режим), и, как следствие, к увеличению времени осаждения частиц табачного дыма, что показано в работе [15] для мелкодисперсного аэрозоля. Вибростенд управлялся с компьютера с помощью пьезоэлектрического IEPE акселерометра марки 4513 фирмы Bruel & Kjaer и контроллера типа VR9500 фирмы Vibration Research Corporation. В качестве рабочей среды использовался табачный дым. Геометрический диаметр его частиц определялся лазерным спектрометром LAP-320 фирмы TOPAS [10] и лежал в пределах от 1 до 20 мкм. Для измерения давления среды применялся пьезоэлектрический датчик давления модели 8530C-15 фирмы Bruel & Kjaer, размещенный вблизи поршня. Сигнал с него подавался на трехканальный мостовой усилитель напряжения ENDEVCO модель 136 фирмы Bruel & Kjaer, а затем на цифровой осциллограф модели DSO 3062A фирмы Agilent Technologies. Процесс осаждения табачного дыма записывался на камеру Canon EOS 650D с объективом EF-S 18-55mm IS II Black, которая располагалась на штативе, перпендикулярно трубе на расстоянии 0.5 м от нее. За трубой устанавливался черный экран для получения четкой и контрастной картины. Измерение светопрозрачности табачного дыма производилось люксметром марки АТТ-1505 фирмы Актаком. В качестве источника света использовался лазер с дистанционным управлением U119 с выходной мощностью 5 мВт, длиной волны 650 нм, рабочим напряжением 3–5 В и рабочей температурой от +10 до +40°C. Лазер размещался так, чтобы луч света проходил через трубу сквозь дым и попадал в центр светочувствительного датчика люксметра. Данные с люксметра обрабатывались на компьютере специальной программой АТТ-1006.

Эксперименты проводились при заполнении дымом трубы на различную высоту $L' = h/L$: на четверть ее длины $L' = 0.25$ ($h = 0.23$ м), половину $L' = 0.5$ ($h = 0.46$ м), три четверти $L' = 0.75$ ($h = 0.689$ м) и полностью $L' = 1$ ($h = 0.918$ м). Во всех случаях табачный дым запускался в трубу с одинаковой начальной числовой концентрацией $N_0 = 7 \times 10^8$ частиц/см³, что соответствует малым объемному $\alpha = 5.02 \times 10^{-5}$ и массовому $m = 0.058$ содержаниям частиц табачного дыма в трубе [6]. В условиях, когда вынужденная частота смещения поршня совпадает с одной из собственных частот колебаний среды $\nu_n = n\nu_0$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) в трубе, имеет место резонанс и амплитуда колеба-

ний увеличивается. Первая ($n = 1$) собственная частота находится из волнового уравнения. Для условий данного эксперимента она равна $\nu_1 = c_0/4L(1 + \beta') = 90.3$ Гц, где β' – коэффициент диссипации. Задавались синусоидальные колебания на данной частоте с амплитудами смещения поршня $l = 0.375, 0.75$ и 1.5 мм, включалась видеосъемка и регистрация данных с люксметра. При указанных амплитудах возбуждения происходило искажение формы волны давления среды, но ударные волны не возникали, что соответствовало переходному режиму колебаний [16].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1а–1г приведены типичные кадры осаждения табачного дыма для случая трубы, заполненной на четверть, половину, три четверти ее длины и полностью, при амплитуде смещения поршня $l = 0.75$ мм на первой собственной частоте $\nu = 90.3$ Гц. После запуска колебаний и достижения первой собственной частоты начиналось движение дыма в виде вихрей и происходило осаждение дыма на стенках трубы. Визуализация процесса показала, что для всех случаев вихри образовывались внутри трубы. Только при полном заполнении часть дыма из верхней части трубы выбрасывалась в окружающее пространство.

Такое движение дыма обусловлено вторичными течениями в виде тороидальных вихрей, возникающими в трубе при нелинейных колебаниях [17]. Вихри занимают практически всю длину трубы, а вблизи поршня и открытого конца трубы имеются участки с направлением движения, противоположным направлению движения основных вихрей (рис. 1д). Таким образом, на дым, заполняющий трубу частично (рис. 1а–1в), оказывал влияние только основной вихрь, и частицы двигались только внутри трубы, а при полном заполнении (рис. 1г) за счет участка вихревого дви-

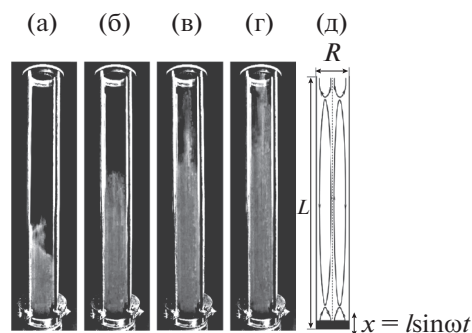


Рис. 1. Кадры характерного движения табачного дыма при колебаниях в открытой трубе, заполненной на четверть (а), наполовину (б), три четверти (в), полностью (г), и схема вторичного течения при нелинейных колебаниях в открытой трубе [17] (д).

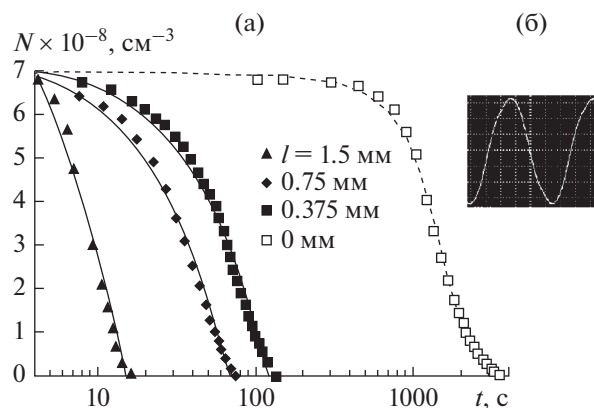


Рис. 2. Зависимость числовой концентрации частиц табачного дыма, заполняющего открытую трубу на три четверти (а), и колебаний давления среды вблизи поршня (б) от времени: сплошная линия — экспоненциальная аппроксимация, штриховая — аппроксимация Больцмана.

жением вблизи открытого конца часть дыма в верхней части трубы выбрасывалась в окружающую среду.

На рис. 2а представлены графики зависимости числовой концентрации частиц табачного дыма, заполняющего трубу на три четверти, от времени при различных амплитудах смещения поршня на первой собственной частоте $\nu = 90.3$ Гц и при отсутствии колебаний. Монотонное уменьшение числовой концентрации частиц табачного дыма со временем связано с осаждением их на стенках трубы. Когда колебания отсутствуют, естественное осаждение в трубе заканчивается примерно за 3000 с, это в десятки раз медленнее, чем при наличии колебаний. Ускоренное осаждение дыма в трубе при наличии колебаний, как уже говорилось выше, обусловлено вторичными течениями в виде вихрей, вовлекающих в движение частицы. С увеличением амплитуды смещения поршня возрастает интенсивность колебаний, соответственно увеличиваются амплитуда колебаний давления и скорость вихревого движения, что ведет к более быстрому уменьшению числовой концентрации. При этом для всех исследуемых амплитуд смещения поршня форма волны давления среды близка к синусоидальной (рис. 2б).

На основании полученных данных определялась зависимость времени осаждения дыма от высоты заполнения для разных амплитуд смещения поршня (рис. 3). Обнаружен немонотонный характер этой зависимости. Например, для амплитуды смещения поршня $l = 1.5$ мм минимальное время осаждения дыма (9 с) имело место в наименее заполненной трубе, где наблюдался существенный выброс в свободную часть трубы. Несколько медленнее происходило осаждение в трубе, заполненной дымом наполовину (11 с) и на

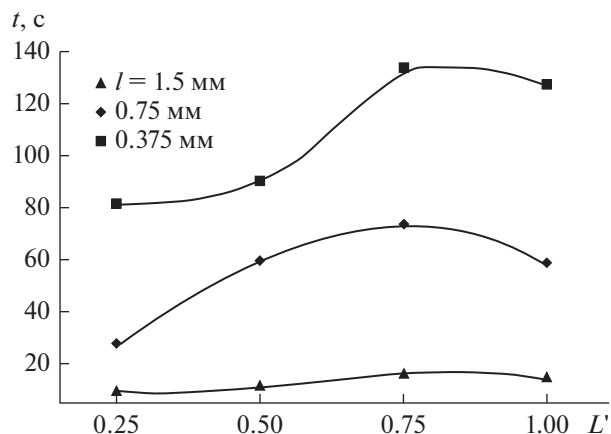


Рис. 3. Зависимость времени осаждения табачного дыма от высоты заполнения трубы на первой собственной частоте $\nu = 90.3$ Гц: сплошные линии — полиномиальная аппроксимация.

три четверти (16 с). При этом в полностью заполненной трубе время осаждения снова уменьшается (14 с). Это связано с тем, что при полном заполнении часть дыма в верхней части трубы выбрасывается в окружающую среду (рис. 1г). Изменение амплитуды смещения поршня оказывает значительное влияние на время осаждения дыма. Так, для вдвое меньшей амплитуды смещения поршня $l = 0.75$ мм эти значения равны уже 28, 60, 74 и 59 с соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате экспериментальных исследований выявлено, что нелинейные колебания табачного дыма в открытой трубе на первой собственной частоте в переходном режиме, когда ударные волны не образуются, ведут к ускорению осаждения дыма в десятки раз по сравнению со случаем отсутствия колебаний. Выявлен немонотонный характер зависимости времени осаждения от степени заполнения трубы, что связано с образованием вихревого вторичного течения. Обнаружено, что для рассмотренных высот заполнения трубы дымом наименьшее время осаждения соответствует четверти трубы, максимальное — трем четвертям. При полном заполнении трубы время осаждения снова уменьшается, что связано с выбросом дыма из верхней части трубы в окружающее пространство.

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. Yuen W.T., Fu S.C., Kwan J.K.C., Chao C.Y.H. The Use of Nonlinear Acoustics as an Energy Efficient Tech-

- nique for Aerosol Removal // *Aerosol Sci. Technol.* 2014. V. 48. P. 907.
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. *Вараксин А.Ю.* Гидрогазодинамика и теплофизика двухфазных потоков: проблемы и достижения (обзор) // *ТВТ.* 2013. Т. 51. № 3. С. 421.
 5. *Вараксин А.Ю.* Обтекание тел дисперсными газовыми потоками (обзор) // *ТВТ.* 2018. Т. 56. № 2. С. 282.
 6. *Нигматулин Р.И.* Динамика многофазных сред. Т. 1. М.: Наука, 1987. 464 с.
 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 открытой трубе в безударно-волновом режиме // *ТВТ.* 2013. Т. 51. № 6. С. 955.
 13. *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.
 14. *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.
 15. *Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Ткаченко Л.А., Шайдуллин Л.Р.* Динамика аэрозоля в открытой трубе при колебаниях различной интенсивности вблизи резонанса // *ТВТ.* 2018. Т. 56. № 1. С. 145.
 16. *Зарипов Р.Г., Ткаченко Л.А., Шайдуллин Л.Р.* Вынужденные продольные колебания газа в открытой трубе вблизи резонансной частоты возбуждения // *ИФЖ.* 2017. Т. 90. № 6. С. 1537.
 17. *Ткаченко Л.А., Сергиенко М.В.* Резонансные колебания газа в открытой трубе в безударно-волновом режиме // *Акуст. журн.* 2016. Т. 62. № 1. С. 44.