

Нелинейные колебания аэрозоля в безударно-волновом течении в открытой трубе¹

Ткаченко Л.А.

Институт механики и машиностроения Казанского научного центра РАН, Казань

Экспериментально исследованы нелинейные колебания аэрозоля в открытой трубе в безударно-волновом режиме на резонансе при различных амплитудах возбуждения. Эпюры давления имеют непрерывный характер. С увеличением амплитуды возбуждения происходит рост размаха колебаний давления среды. При больших амплитудах наблюдается форма колебаний близкая к гармонической. Числовая концентрация капель аэрозоля монотонно убывает со временем. Это связано с коагуляцией аэрозоля, заключающейся в слиянии капель и осаждении их на стенках трубы, а также выбросом аэрозоля в окружающее пространство. С увеличением амплитуды возбуждения зависимости приобретают большую кривизну и время просветления аэрозоля уменьшается. При этом время просветления аэрозоля в 5–10 раз ниже, чем при естественном осаждении.

1. Введение

В реальных устройствах, таких как газотурбинные установки, парогенераторы, трубопроводные системы компрессоров, камеры сгорания жидкостных и твердотопливных ракетных двигателей, могут возникать резонансные колебания рабочей среды. При этом происходит увеличение местного коэффициента теплоотдачи, механических и тепловых напряжений, что приводит не только к поломке элементов конструкции, но и к полному ее разрушению. Возникновение резонансных колебаний среды может иметь положительную сторону, например, повышение теплонапряженности топочных камер, улучшения тепло- и массообмена, снижение гидравлического сопротивления. Особый интерес представляют собой колебания газа в открытой трубе, которые, в частности, могут быть использованы при распылении жидких и пастообразных средств во внешнем волновом поле вблизи открытого торца. В этом направлении были получены результаты по изучению внешнего волнового поля, в частности выявлено, что скорость газа в пульсирующей струе во внешнем волновом поле может достигать 150 м/с и выше. Также были обнаруже-

ны ударные волны вблизи субгармонических частот и ряд других эффектов. Подробный анализ работ по теоретическому и экспериментальному исследованиям нелинейных колебаний однородного газа в трубах приведен в [1,2]. Основы волновой динамики многофазных сред и некоторые приложения исследований в этой области представлены в [3]. Колебательные процессы в двухфазных средах, заполняющих ограниченные объемы, подробно рассматриваются в [4]. Исследование волновой динамики в таких средах вблизи резонансных частот представляет значительный интерес. Одним из практических приложений является эффективная коагуляция аэрозолей и их осаждение на стенках. Результаты таких исследований могут быть использованы во многих отраслях промышленности, в энергетике и экологии, а также при решении фундаментальных проблем аэрогидродинамики. В монографиях [5, 6] рассмотрена коагуляция и осаждение капель или частиц аэрозолей в волновых полях при интенсивном гармоническом возбуждении в основном в больших объемах. Поведение аэрозоля при его нелинейных колебаниях в закрытой трубе вблизи фундаментальной частоты исследовалось в экспериментальных работах [7–9]. В [10] изучался случай колебаний в закрытой и открытой трубах вблизи субгармонического резонанса, частота которого вдвое меньше фундаментальной. В работах [11, 12] экспериментально выявлены особенности процесса ускоренной коагуляции и осаждения аэрозоля в закрытой и открытой трубах для ча-

¹Работа выполнена в рамках программы ОЭМПУ РАН (№ 13 ОЭ) и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (гос. контракт 14.740.11.0351), при финансовом содействии РФФИ (грант № 10-01-00098) и Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ РФ (грант НШ-834.2012.1).

стоты, которая является четвертью от фундаментальной частоты для закрытой трубы и половиной — для открытой трубы. Основным нелинейным эффектом являлась ускоренная коагуляция и осаждение на стенках трубы капель машинного масла и табачного дыма [7], капель олеиновой кислоты [8], частиц дыма, полученных от сгорания палки ладана [9], и капель, получаемых из жидкости ди-этил-гексил-себакат (DEHS) [10–12]. Геометрический диаметр капель и частиц аэрозоля составлял 1410 мкм [7,8], 0.3 мкм [9] и 0.83 мкм [10–12]. В указанных работах экспериментально исследовался ударно-волновой режим при значениях амплитуд возбуждения свыше 0,1 бар. Режим безударно-волнового течения аэрозоля (DEHS), когда пристеночные потери при значениях амплитуд порядка 0,01 бар становятся существенными, исследовался лишь для случая закрытой трубы [13].

В связи с этим целью работы является изучение колебаний аэрозоля в открытой трубе в указанном режиме на резонансе при различных амплитудах возбуждения.

2. Экспериментальная установка

Продольные установившиеся колебания аэрозоля в кварцевой трубе (длина 1,06 м, внутренний диаметр 0,0365 м, внешний диаметр 0,041 м) создаются цилиндрическим поршнем с плоской рабочей поверхностью диаметром 0,0365 м, колеблющемся по синусоидальному закону в цилиндре от двухтактного микродвигателя МДС 218КУ-К внутреннего сгорания. Поршень вместе с системой установки на стол вибростенда имеет вес 0,15 кг. Он приводится в движение вибростендом марки TV51075 с усилителем мощности типа ВАА 120 фирмы TIRA (Дания). Труба удерживается в вертикальном положении при помощи стяжек, закрепленных на стенке, и насадки, размещенной на верхнем конце трубы. Стол представляет собой сварную металлическую конструкцию из стальных уголков и имеет два основания. К верхнему основанию крепится экспериментальная установка. Нижнее основание служит для загрузки балластом из различного материала, благодаря этому установка имеет устойчивость к вибрациям. Управление вибростендом осуществляется с помощью программного модуля SineVIEW (VR610), установленного на компьютер, посредством пьезоэлектрического IEPPE акселерометра со встроенной электроникой марки 4513-001 фирмы Bruel and Kjaer (Дания) и контроллера типа VR8500-1 фирмы Vibration Research Corporation (США). К отверстию насадки подсоединяется пьезоэлектрический датчик давления модели 8530C-15 фирмы Bruel and Kjaer, сигнал с которого че-

рез трехканальный мостовой усилитель напряжения модели ENDEVCO 136 фирмы Bruel and Kjaer подается на цифровой осциллограф модели DSO 3062A фирмы Agilent Technologies, а затем на компьютер, на мониторе которого с помощью специального программного обеспечения DSO3000 можно наблюдать и сохранять полученные экспериментальные данные. Светопроницаемость аэрозоля измеряется люксметром марки АТТ-1505 фирмы Актаком. На стяжке перпендикулярно трубе размещен источник света (лазер) с дистанционным управлением, длиной волны 630 нм и мощностью 0,16 Вт. Лазер устанавливается так, чтобы сквозь аэрозоль свет попадал в центр светочувствительного датчика люксметра. Данные с люксметра через интерфейс RS-232 подаются на компьютер и обрабатываются программой, прилагающейся к люксметру. В качестве рабочей жидкости используется С26Н5О4 — ди-этил-гексил-себакат, аэрозоль из нее создается при помощи аэрозольного генератора АТМ 225 фирмы TOPAS (Германия) с постоянным объемным расходом потока, равным 250 л/час ($1,68 \times 10^8$ капель/сек). Диаметр полученных капель аэрозоля составляет в основном 0,83 мкм [10].

3. Методика эксперимента

Рассмотрим методику экспериментов. Включаем все приборы, конфигурируем программное обеспечение для управления вибрационными испытаниями и с помощью специальной программы DSO3000 переводим управление осциллографа на виртуальную панель на компьютере. Производим настройку усилителя, задавая необходимый коэффициент усиления. Устанавливаем необходимые масштабы напряжения и скорости развертки на осциллографе.

Запускаем программу для синусоидальных испытаний на компьютере, задаем значения частоты и амплитуды колебаний с точностью до 10^{-6} Гц и 10^{-7} м, соответственно. После достижения частоты и амплитуды заданного уровня, записываем на компьютере входной синусоидальный сигнал перемещения поршня и выходной сигнал с датчика давления.

После пошагового просмотра осциллограмм выходного сигнала, выбираем необходимую запись колебаний давления газа во времени, с точностью до 0,3 мВ замеряем соответствующее напряжение и сохраняли данный кадр. То же самое выполняем для всех частот и амплитуд колебаний.

Для замера светопроницаемости включаем все приборы и записываем начальные значения люксметра Φ_0 для воздуха, заполняющего трубу. Измерения освещенности проводятся с точностью до 1%. В отверстие насадки в нижней части трубы встав-

ляем резиновый шланг от аэрозольного генератора. Далее на верхнюю насадку трубы устанавливаем крышку с отверстием диаметра 3 мм для устранения избыточного давления. Начальная концентрация аэрозоля всегда равняется $3,5 \times 10^6 \text{ см}^{-3}$ [13], для чего в каждом эксперименте заполняем трубу аэрозолем в течение 23 секунд. После чего отключаем аэрозольный генератор, отсоединяем резиновый шланг от отверстия насадки и закрываем это отверстие. С помощью датчика дистанционного управления включаем лазер и фиксируем показания люксметра Φ_1 . Запускаем программу для синусоидальных испытаний с заданными значениями частоты и амплитуды возбуждения. Убираем крышку с отверстием с верхней насадки, труба становится полностью открытой. Далее включаем лазер при помощи датчика дистанционного управления через определенный промежуток времени. Изменение светопропускаемости аэрозоля в ходе эксперимента приводит к изменению показаний люксметра Φ_t , которые регистрируются на компьютере. Эксперимент проводим до полного осаждения аэрозоля на стенках трубы. Останавливаем программу для синусоидальных испытаний. Тщательно прочищаем трубу от слоя осажденных капель аэрозоля. После чего эксперимент повторяем для других значений амплитуды возбуждения в указанной выше последовательности. Для расчета числовой концентрации аэрозоля из полученных с люксметра данных пользуемся соотношением [13]:

$$N = 3,5 \times 10^6 (\Phi_t - \Phi_0) / (\Phi_1 - \Phi_0) \text{ см}^{-3}.$$

Результаты представлены на рис. 1.

Зависимость времени просветления от относительной амплитуды возбуждения приведена на рис. 2. Каждая точка на нем соответствует отдельному эксперименту. С увеличением относительной амплитуды возбуждения время просветления уменьшается практически линейно. Такое уменьшение связано с тем, что при увеличении амплитуды колебаний коагуляция капель, осаждение на стенках трубы и частичный выброс аэрозоля из открытого конца трубы происходят более интенсивно. Можно отметить, что время просветления примерно в 1,5 раза меньше, чем время коагуляции и осаждения аэрозоля в закрытой трубе [13]. Это связано с тем, что в открытой трубе часть аэрозоля выбрасывается в окружающую среду.

4. Заключение

Таким образом, в результате экспериментальных исследований выявлено, что при малых амплитудах возбуждения, когда колебания имеют гармонический характер, наблюдается плавное уменьше-

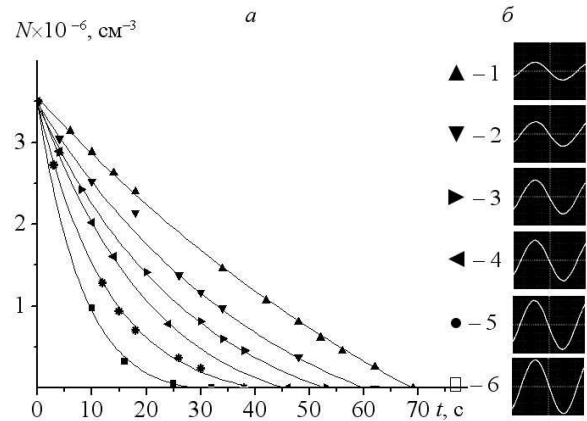


Рис. 1. Зависимость (а) — числовой концентрации капель аэрозоля и (б) — колебаний давления от времени при частоте 78,6 Гц при различных относительных амплитудах возбуждения: 1 — $\varepsilon = 4,716$, 2 — $\varepsilon = 6,603$, 3 — $\varepsilon = 9,433$, 4 — $\varepsilon = 11,792$, 5 — $\varepsilon = 14,15$, 6 — $\varepsilon = 16,037$, сплошные линии — экспоненциальные аппроксимации

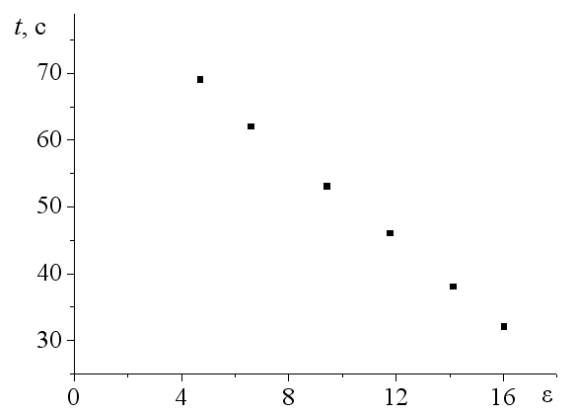


Рис. 2. Зависимость времени просветления от относительной амплитуды возбуждения при частоте 78,6 Гц

ние числовой концентрации капель аэрозоля. Далее, с увеличением амплитуды возбуждения происходит увеличение размаха колебаний давления, при больших амплитудах форма колебаний становится близкой к гармонической, начинают возникать акустические течения, и зависимость числовой концентрации приобретает большую кривизну. Наблюдается практически линейная зависимость времени просветления аэрозоля от амплитуды возбуждения. Время просветления примерно в 1,5 раза меньше, чем время коагуляции и осаждения в закрытой трубе.

Список литературы

- [1] Ильгамов М.А., Зарипов Р.Г., Галиуллин Р.Г., Реппин В. Б. Нелинейные колебания газа в трубе // Тематический сборник: Обзоры исследований по механике сплошной среды. Казань: ИММ КазНЦ РАН. 1995. С. 79–130.
- [2] Зарипов Р.Г., Галиуллин Р.Г., Галиуллина Э.Р. Нелинейные колебания газа в трубах // Тематический сборник «Актуальные проблемы механики сплошной среды. К 10-летию ИММ КазНЦ РАН». Казань: ИММ КазНЦ РАН. 2001. С. 19–35.
- [3] Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Т. 1. М.: Наука, 1987. 464 с.
- [4] Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Нелинейная волновая механика и технология. М.: Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2008. 712 с.
- [5] Медников Е.П. Акустическая коагуляция и осаждение аэрозолей. М.: Издательство АН СССР, 1963. 263 с.
- [6] Temkin S. Suspension acoustics: An introduction to the physics of suspensions. New York: Cambridge University press, 2005. 400 p.
- [7] Гуляев А.М., Кузнецов В.М. Коагуляция аэрозолей под действием периодических ударных волн // Акустический журнал. 1962. Т. 8, № 4. С. 473–475.
- [8] Temkin S. Droplet agglomeration induced by weak shock waves // Phys. Fluids. 1970. V. 13. P. 1639–1641.
- [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. 1802–1805.
- [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 // Теплофизика высоких температур. 2004. Т. 42, № 5. С. 788–795.
- [11] Сонин Н.В. Экспериментальное исследование ускоренной коагуляции аэрозоля при субгармоническом резонансе в закрытой трубе // Известия вузов. Авиационная техника. 2004. № 2. С. 76–78.
- [12] Сонин Н.В. Особенности ускоренной коагуляции аэрозоля при субгармоническом резонансе в открытой трубе // Известия вузов. Авиационная техника. 2008. № 1. С. 74–76.
- [13] Ткаченко Л.А., Зарипов Р.Г. Особенности нелинейных колебаний аэрозоля в закрытой трубе в безударно-волновом режиме // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Механика жидкости и газа. 2011. № 4(3). С. 1171–1173.