

УДК 532.529: 534.2

## **НЕЛИНЕЙНЫЕ КОЛЕБАНИЯ АЭРОЗОЛЕЙ В ТРУБАХ**

Л.А. Ткаченко

[luda\\_tkachenko@inbox.ru](mailto:luda_tkachenko@inbox.ru)

Приводится краткий обзор экспериментальных и теоретических работ по исследованию коагуляции и осаждению аэрозоля в трубах с различными условиями на концах в окрестности резонансных частот, включая субгармонический резонанс, при которых сильно выражены нелинейные эффекты. Представлены особенности ускоренной коагуляции аэрозолей и дрейфа частиц при нелинейных колебаниях.

Исследование волновых процессов в многофазных средах представляет собой одну из актуальных проблем механики. Из многообразия гетерогенных сред могут быть выделены дисперсные смеси, имеющие сравнительно регулярный характер и представляющие смесь нескольких фаз, одной из которых являются различные включения (капли, пузырьки, твердые частицы) – аэрозоли, туманы, пузырьковые жидкости, взвеси и т.д. Основные модели волновой динамики многофазных сред и ряд результатов исследований в этой области представлены в [1]. Колебательные процессы в двухфазных ограниченных средах подробно рассматриваются в [2-4]. Особое значение имеет изучение колебаний аэрозолей с сильно нелинейными фронтами волн, сопровождающихся коагуляцией и осаждением на ограничивающихся поверхностях. Они представляют интерес для практического применения (интенсификация распыления жидкостей с целью очистки отходящих газов на вредных производствах, осаждение аэрозоля в различных технических устройствах, интенсификация перемешивания и горения и т.п.). Акустическая коагуляция аэрозолей, при которой происходит объединение и слипание частиц или капель под воздействием акустических волн, а также их осаждение, хорошо известное явление, которое подробно рассматривается в монографиях [5-13] и обзорах [14-16]. При этом результаты об указанных процессах получены главным образом для аэрозолей в больших объемах в условиях интенсивного гармонического возбуждения их

вдали от резонансных частот колебаний. Между тем, широко применяемой в технике является система типа труба-резонатор, в которой при возбуждении среды вблизи резонансов возникают сильно нелинейные волны давления, вплоть до периодических ударных волн.

В настоящем обзоре ограничимся лишь работами по коагуляции и осаждению аэрозолей в трубах вблизи резонансных частот, подробно останавливаясь на результатах экспериментов. Обзор теоретических и экспериментальных исследований нелинейных резонансных колебаний однородного газа в трубах с различными условиями на концах приводятся в [17, 18]. Отмечается, что резонансные режимы колебаний газа сопровождаются рядом нелинейных эффектов, таких как турбулизация потока, возникновение вторичных течений и акустотермических процессов, генерация высших гармоник, образование пульсирующей струи во внешнем волновом поле вблизи открытого конца и т.п. Случай нелинейных резонансных колебаний аэрозолей в трубах является мало изученным. Экспериментальному изучению этого явления посвящены работы [19-38]. В работе [19] исследовалась коагуляция капель машинного масла и табачного дыма в режимах дорезонансных частот и первой собственной частоты  $\nu_{11} = 50$  Гц. Продольные колебания генерировались плоским поршнем с амплитудой  $l = 0,05$  м на одном из концов трубы. Диаметры капель и частиц составляли от 1 до 10 мкм. Было выяснено, что появление периодической ударной волны с перепадом давления  $\Delta p = 0,32$  атм. в резонансе приводит к ускоренной коагуляции капель масла, в результате чего коагуляция заканчивается уже через несколько секунд. Причем даже слабые ударные волны обеспечивают более высокую скорость коагуляции капель, чем синусоидальные колебания большой амплитуды, широко используемые в различных устройствах [5, 6, 8]. Экспериментально наблюдалось [20] укрупнение исходных капель олеиновой кислоты с диаметрами  $1 \div 10$  мкм до диаметров 80 мкм. В работе [21] исследовалась коагуляция частиц дыма, полученного от сгорания палки ладана, в закрытой прозрачной трубе при первой собственной частоте  $\nu_{11} = 46,6$  Гц и амплитуде колебаний поршня  $l = 0,022$  м. Изучалось изменение светопрозрачности дыма с частицами размерами менее 0,3 мкм со временем. Также как и в работе [19], периодические ударные волны с  $\Delta p = 0,3$  атм ускоряли процесс коагуляции частиц, в

результате чего она заканчивалась через 30 - 50 секунд. В [22] экспериментально изучена динамика низкоконцентрированного полидисперсного аэрозоля из частиц латекса с диаметром  $0,3 \div 10$  мкм под действием резонансных колебаний газа. Проводился замер концентрации аэрозоля лазерным счетчиком частиц до и после возбуждения колебаний. Найдено, что концентрация аэрозоля экспоненциально уменьшается со временем. Взаимодействие капель воды при воздействии на них ударной волны, возбуждаемой в трубе, экспериментально изучалось в [23, 24]. В [23] получены траектории капель воды диаметром 87-775 мкм под действием ударных волн с амплитудой давления 0,0018-0,3 бар. Эксперименты [24] проводились при больших числах Рейнольдса ( $Re=140$ ) для капель диаметром 270 мкм и применялось единичное ударное возбуждение, создающее основные трудности при исследовании акустической коагуляции. В работах [25-36] изучены нелинейные колебания мелкодисперсного аэрозоля в закрытой и открытой трубах различной длины в диапазоне частот от 0 до 18 Гц, включающем субгармонический резонанс (частота, вдвое меньшей первой собственной). Аэрозоль с геометрическим диаметром капель менее 1 мкм создавался аэрозольным генератором АТМ-225 из ди-этил-гексил-себаката  $C_{26}H_{50}O_4$ . Для возбуждения колебаний аэрозоля использовался типовой компрессор с амплитудой хода поршня  $l = 0,043$  м и внутренним диаметром цилиндра  $2R = 0,077$  м. Коленчатый вал кривошипно-шатунного механизма приводится во вращение электродвигателем постоянного тока. Цилиндр компрессора соединялся с трубой-резонатором через сужающийся конусный переходник высотой  $h = 0,22$  м. Труба-резонатор, максимальная длина которой достигала  $L = 6,7$  м, состояла из одинаковых секций длиной 0,5 м и внутренним диаметром  $2R_0 = 0,048$  м, и располагалась горизонтально. Одна секция, изготовленная из кварцевого стекла, имела длину 1,2 м. Для измерения концентрации аэрозоля в процессе его колебаний использовался датчик светопрозрачности, установленный на кварцевой секции трубы. Направленный луч света проходил перпендикулярно трубе сквозь аэрозоль и попадал на фотосопротивление. Затем сигнал с фотосопротивления через усилитель преобразовывался в напряжение, которое фиксировалось цифровым вольтметром и затем переводилось в значения числовой концентрации капель. Получены зависимости числовой концентрации капель аэрозоля от

времени и изучено влияние частоты и интенсивности колебаний на процесс коагуляции и осаждения капель. Установлен немонотонный характер зависимости времени коагуляции и осаждения капель аэрозоля от частоты возбуждения с минимальным значением на резонансе (рис. 1). Установлено [30-32, 34, 35], что с увеличением начальной концентрации аэрозоля для всех рассматриваемых длин труб и частот возбуждения время коагуляции и осаждения возрастает. Показано, что для различных значений начальной концентрации аэрозоля с увеличением интенсивности колебаний, обусловленной уменьшением длины трубы, время коагуляции и осаждения падает. Обнаружено,

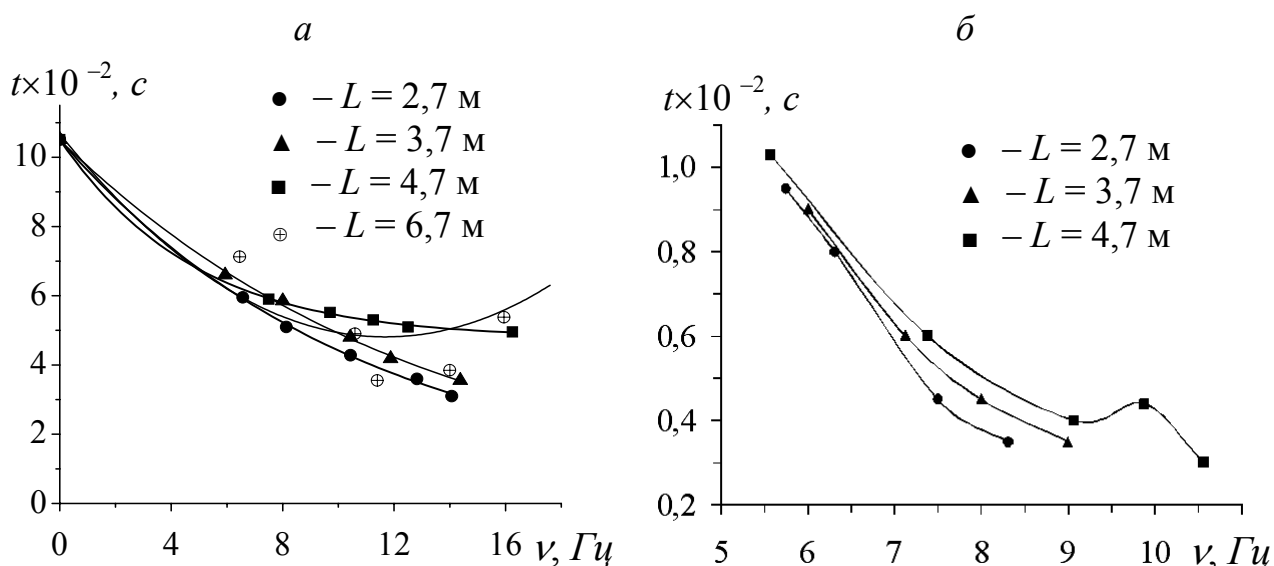


Рис. 1. Зависимость времени коагуляции и осаждения аэрозоля от частоты: *a* – закрытая труба, *б* – открытая труба. Точки – экспериментальные данные, сплошные линии – полиномиальная аппроксимация.

что при наложении нелинейных колебаний на процесс коагуляции невозмущенного аэрозоля общее время коагуляции снижается. Влиянию геометрии фланца на пассивном конце трубы на процесс коагуляции и осаждения аэрозоля (рис. 2) посвящены работы [35, 36]. В работах [37, 38] экспериментально выявлены особенности процесса ускоренной коагуляции и осаждения аэрозоля в закрытой и открытой трубах для частоты 48,7 Гц, которая является четвертью от фундаментальной частоты для закрытой трубы и половиной – для открытой трубы. Продольные колебания аэрозоля в вертикальной стеклянной

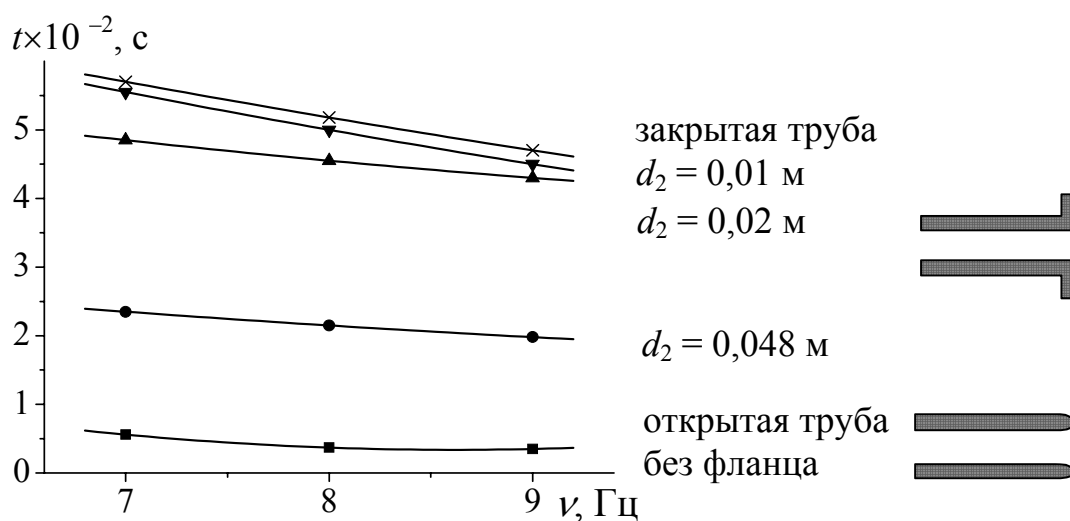


Рис. 2. Зависимости времени коагуляции и осаждения аэрозоля от частоты возбуждения для трубы с фланцами различных внутренних диаметров  $d_2$ . Сплошные линии – полиномиальная аппроксимация.

трубе длиной  $L_0 = 0,886$  м и внутренним диаметром  $2R = 0,0393$  м создавались плоским поршнем. Колебания поршня с амплитудой  $l = 0,014$  м осуществлялись кривошипно-шатунным механизмом, вращение которого осуществлялось асинхронным двигателем. Для определения светопроницаемости и рассеяния аэрозоля использовался полупроводниковый лазер, который являлся источником света. Яркость лазерного луча и яркость луча, рассеянного под углом  $90^\circ$ , в различных сечениях измерялись фотоэлектрическим датчиком. Обнаружен немонотонный характер распределения интенсивности рассеянного света в поперечном и продольном направлениях трубы. Выявлено, что колеблющийся аэрозоль имеет конечную глубину проникновения света от пассивного конца к поршню, которая в резонансе монотонно возрастает со временем. По сравнению с закрытой трубой [37] скорость изменения глубины проникновения в открытой трубе выше [38].

Имеется ряд теоретических работ по акустической коагуляции и осаждения аэрозолей на стенках в трубы при гармоническом возбуждении [6-12, 14-16, 22, 33, 39-58]. При моделировании указанных явлений часто возникает задача подробного изучения движения отдельных частиц под действием различных сил, возникающих в периодических волновых полях, и их взаимодействие. Различные механизмы взаимодействия частиц в сильных акустических полях рассматрива-

ются в [15, 16], приводятся экспериментальные результаты визуализации для частиц диаметром до 50 мкм в диапазоне частот 400-900 Гц [15]. Большое количество работ посвящено осаждению аэрозоля в турбулентном потоке в трубах и каналах (например, [39-41]). В [42] численно анализируется взаимодействие двумерного звукового поля с взвешенными частицами. Показано, что кроме известного дрейфа частиц к узлам и пучностям скорости волны существует дрейф от них. Направление дрейфа зависит от частоты звуковой волны и от отношения плотности жидкости к плотности частицы. Продольное движение частиц аэрозоля в резонансной трубе было изучено аналитически [43] и численными методами [44]. В этих исследованиях использовались одномерные модели движения невязкого газа, сопровождающегося периодическими ударными волнами. Показано, что частицы аэрозоля дрейфуют к концам трубы со скоростями, зависящими от их размеров. Дрейф вызван ударными волнами и/или газовым ускорением и сжатием. Из-за разности в дрейфовых скоростях, частицы различного размера сталкиваются и слипаются друг с другом, строя агломераты. В [22] численно решается двумерное движение частиц в резонансной трубе под влиянием различных сил. В дополнение к силе сопротивления, рассмотрены подъемная сила Сафмана и термофоретическая сила, действующие на частицы в пределах пограничного слоя, а также воздействие турбулентности на осаждение аэрозоля. На основе численного решения системы уравнений движения вязкого сжимаемого теплопроводного газа исследовался процесс дрейфа твердых сферических частиц в закрытой и открытой трубах и каналах под действием колебаний газового столба, которые возбуждались плоским поршнем, перемещающимся по гармоническому закону на одном из концов [33-35, 47-56]. В [47-49] приведены характерные для первого линейного резонанса ( $\nu_{11} = 170$  Гц) распределения частиц вдоль оси закрытой трубы длиной  $L = 1$  м и диаметром  $2R = 0,05$  м, полученные в предположении о стоковом характере обтекания и показано влияние интенсивности возбуждения, размера частицы и несимметрии переднего и заднего волновых фронтов на среднюю скорость дрейфа. Численно получены поля скоростей акустических течений газа в закрытой трубе в окрестностях первого и второго линейных резонансов [33, 50-52]. Приведены соответствующие распределения частиц в трубе. Распределения легких и тяжелых частиц в волновом поле закрытой трубы и открытого канала [34, 35, 53, 54] вбли-

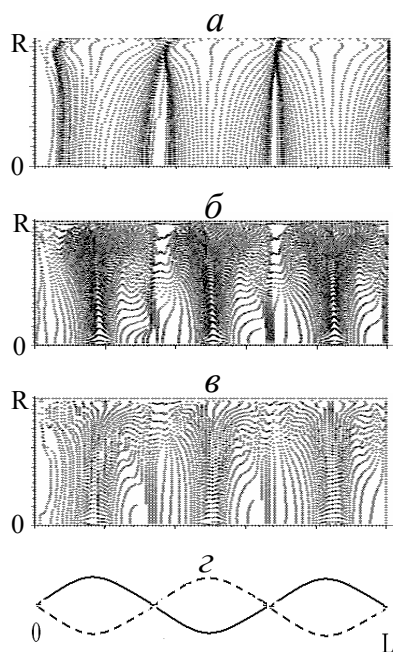


Рис. 3. Распределение частиц для третьего линейного резонанса в закрытой трубе:

- а –  $d = 10^{-4}$  м,  $\rho = 2$  кг/м<sup>3</sup>;
- б –  $d = 10^{-4}$  м,  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;
- в –  $d = 10^{-6}$  м,  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;
- г – эпюры стоячей волны скорости.

трех собственных частот. Критерий, позволяющий в зависимости от соотношения между постоянной времени частицы, временем нарастания фронта сжатия и длительностью акустической волны определять преобладающий механизм и направление дрейфа твердой сферической аэрозольной частицы в нелинейном волновом поле закрытого акустического резонатора анализируется в [56]. Поле скоростей газа содержит периодические нелинейные волны и акустическое течение, движение частиц происходит под действием сил Стокса,

зи первой ( $\nu_{11} = 170$  Гц), второй ( $\nu_{21} = 340$  Гц) и третьей ( $\nu_{31} = 510$  Гц) собственных частот колебаний газового столба. На рис. 3 и рис. 4 даны результаты для безразмерных значений радиуса  $R$  и длины трубы  $L$  при третьем линейном резонансе. В работе [55] предложена методика численного моделирования динамики монодисперсной газовзвеси в нелинейном волновом поле акустического резонатора в окрестности первых

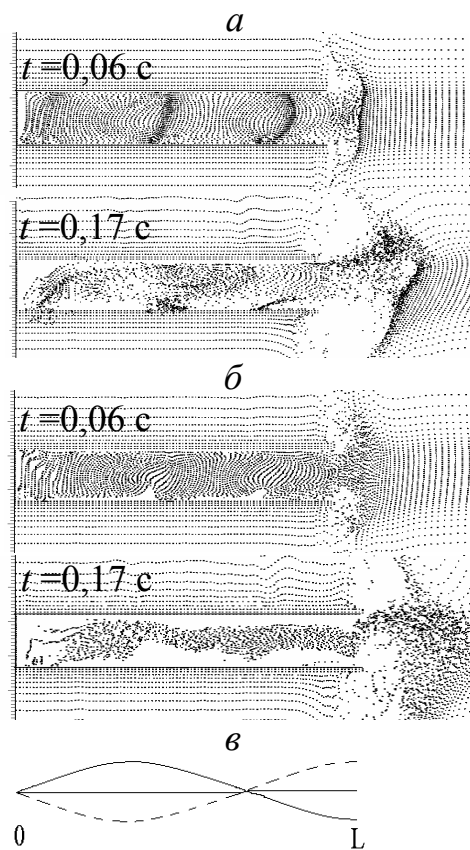


Рис. 4. Распределение частиц для третьего линейного резонанса в открытой трубе:

- а –  $d = 10^{-4}$  м,  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;
- б –  $d = 10^{-6}$  м,  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;
- в – эпюры стоячей волны скорости.

Архимеда, присоединенных масс. В [57, 58] аналитически исследуется дрейф сферического включения в волновых гидродинамических полях для закрытой трубы. Получены формулы для суммарной силы, действующей на сферическую частицу с учетом нелинейных составляющих сил Архимеда и сил присоединенной массы в полях типа стоячей волны в предположении сжимаемости и несжимаемости несущей среды и частицы. Установлено существование характерной частоты, при переходе через которую суммарная сила меняет направление. Предложена диаграмма направления ускорения дрейфа.

Отметим экспериментальную работу [43], в которой исследовался дрейф одиночной легкой сферы из пенополистирола диаметром 3,5 мм, подвешенной на тонкой проволочке через отверстие в трубе, в поле периодических ударных волн в вертикально расположенной закрытой трубе (длина  $L = 3,65$  м, внутренний диаметр  $2R = 0,054$  м, амплитуда хождения поршня  $l = 0,022$  м). Эксперименты проводились только в одном сечении трубы при резонансной частоте  $\nu_{11} = 46,6$  Гц. Видеосъемка с частотой 25 кадров в секунду (выдержка  $1/4000$  с) показала лишь направление движения частицы от поршня к центру. Подробные экспериментальные результаты исследований движения плоской твердой частицы из пенополистирола и сферической частицы из пенополиуретана в горизонтальной трубе различной длины ( $L = 2,7$  м;  $3,7$  м;  $4,7$  м) при нелинейных колебаниях газа вблизи частот субгармонического резонанса представлены в [33-35, 52, 59-66]. Эксперименты проводились на установке ранее использованной для изучения коагуляции и осаждения мелкодисперсного аэрозоля в трубах с различными условиями на концах [25-36]. Рассматривался дрейф плоской частицы (диаметр 16,5 мм, толщина 0,6 мм, вес 4,8 мг) вдоль оси закрытой и открытой труб [33, 59-62], движение сферической частицы (диаметр 20 мм, вес 41,6 мг) вдоль оси закрытой трубы [52, 63] и сферической частицы (диаметр 16 мм, вес 103,7 мг) вдоль оси открытой трубы [64], а также и динамика плоской частицы (диаметр 8 мм, толщина 0,4 мм, вес 2,5 мг) в пристеночной области и радиальном направлении закрытой трубы [62, 65]. Показано, что частица, как от закрытого, так и от открытого конца трубы движется к поршню, в пристеночной области закрытой трубы – в обратную сторону, совершая продольные колебания с увеличением размаха колебаний (рис. 5). Такое движение обусловлено акустическим течением при образовании вихрей. В радиальном направлении колеблющаяся



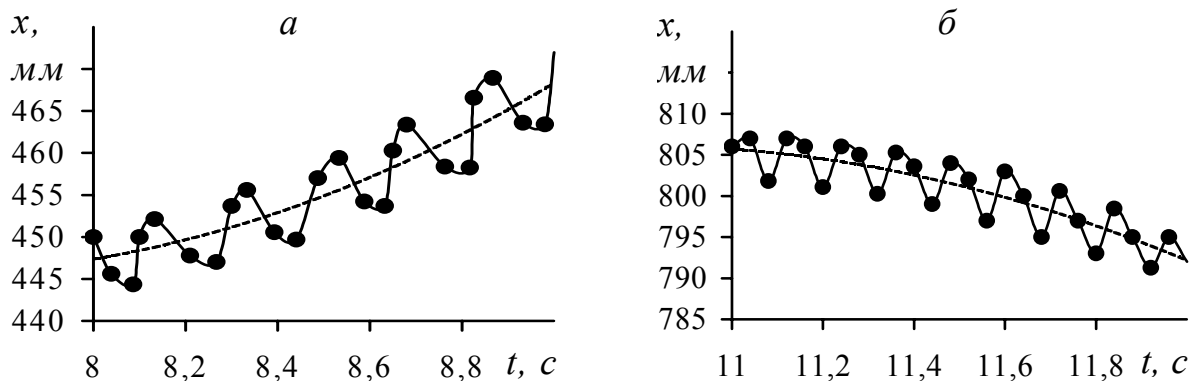


Рис. 5. Зависимость координаты частицы вдоль трубы от времени: а) вдоль оси, б) вблизи стенки. Точки – экспериментальные данные, сплошная и штриховая линии – аппроксимации.

частица движется от оси к стенке закрытой трубы до граничной точки (рис. 6). Скорость плоской частицы на оси в закрытой трубе достигала 0,1 м/с, в открытой 0,8 м/с, сферической 0,04 м/с и 0,35 м/с, соответственно. Во внешнем волновом поле частица в пульсирующей струе практически без колебаний движется (плоская со скоро-

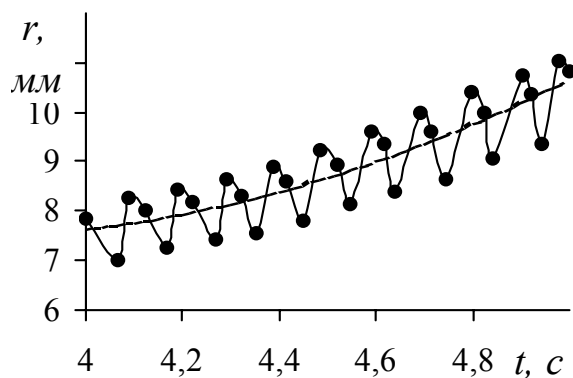


Рис. 6. Зависимость координаты частицы в радиальном направлении трубы от времени. Точки – экспериментальные данные, сплошная и штриховая линии – аппроксимации.

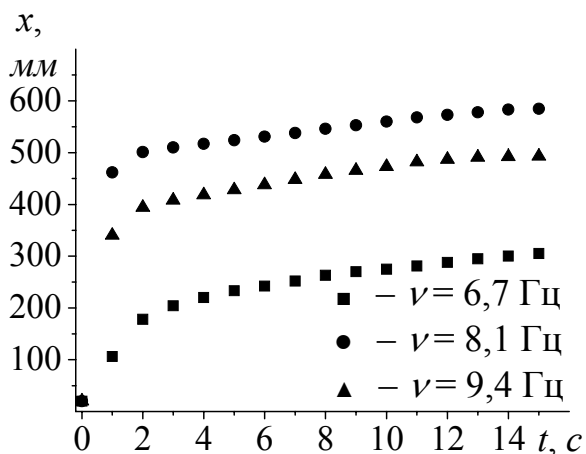


Рис. 7. Зависимость координаты частицы от времени в осевом направлении во внешнем волновом поле трубы.

стью до 3 м/с, сферическая – до 0,5 м/с) в направлении от открытого конца трубы в окружающее пространство (рис. 7). В пристеночной области и в радиальном направлении для плоской частицы наблюдались максимальные скорости 0,03 м/с и 0,001 м/с, соответственно. Увеличение частоты возбуждения газа приводит к росту размаха колебаний частицы и возрастанию ее средней скорости. Дви-

жение сферических частиц с различными геометрическими и физическими параметрами (1: диаметр 15 мм, вес 51,9 мг; 2: диаметр 16 мм, вес 103,7 мг; 3: диаметр 31 мм, вес 637,5 мг) в закрытой трубе при нелинейных колебаниях газа представлено в [66]. Изучено влияние веса и диаметра частицы на ее размах колебаний и среднюю скорость. Показан сдвиг максимума кривой зависимости средней скорости движения частицы от частоты колебаний в сторону увеличения частоты при повышении веса либо диаметра частицы.

Имеется большое количество, как теоретических, так и экспериментальных работ по ультразвуковой коагуляции аэрозолей. В обзоре, помимо упомянутых монографий [5, 13], коснемся лишь несколько из них для ограниченных сред, имеющих важное прикладное значение. Исследования акустической коагуляции полидисперсного аэрозоля из частиц золы от сожженного угля и  $TiO_2$  показали, что на данные процессы оказывают влияние начальные размеры частиц, их концентрации и интенсивность колебаний [67, 68]. Эксперименты были выполнены для двух частот 10 и 21 кГц. Экспериментальное исследование акустической коагуляции частиц золы от зажженного угля в бегущих звуковых волнах представлено также в [69]. Эксперименты проводились в диапазоне частот 700-3000 Гц, уровнях звукового давления 130-147 дБ и числовой концентрации аэрозоля  $10^5 - 3.7 \times 10^5 / \text{см}^3$ . Показано сильное влияние частоты колебаний на коагуляцию аэрозоля. Выявлено, что ортокинетическое взаимодействие – доминирующий механизм для условий проведенных экспериментов. Численное моделирование агломерации частиц золы от сожженного угля и  $TiO_2$  представлено в [70]. Показано, что данный процесс обусловлен ортокинетическим и гидродинамическим механизмами, броуновской коагуляцией и осаждением на стенках. Выполнено сравнение с экспериментальными данными [67, 68].

Работа выполнена при финансовом содействии Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых и ведущих научных школ РФ (грант МК-1316.2010.1 и грант - НШ-4381.2010.1), по программе ОЭММПУ РАН (№ 14 ОЭ), при финансовой поддержке РФФИ (грант № 10-01-00098) и в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг (гос. контракт №14.740.11.0351).

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Нигматулин Р.И.* Динамика многофазных сред. – М.: Наука, 1987. ч. I – 464 с., ч. II – 360 с.
2. *Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е.* Динамика частиц при воздействии вибрации. – Киев: Наукова думка, 1975. – 168 с.
3. *Ганиев Р.Ф., Кобаско Н.И. и др.* Колебательные явления в многофазных средах и их использование в технологии. – Киев: Техника, 1980. – 143 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. *Бергман Л.* Ультразвук и его применение в науке и технике. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1957. – 467 с.
6. *Медников Е.П.* Акустическая коагуляция и осаждение аэрозолей. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 263 с.
7. *Фукс Н.А.* Механика аэрозолей. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 352 с.
8. *Волощук В.М., Седунов Ю.С.* Процессы коагуляции в дисперсной системе. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 320 с.
9. *Волощук В.М.* Кинетическая теория коагуляции. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 311 с.
10. *Hinds W.C.* Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles. – New York: Wiley, 1982. – 480 p.
11. *Акулов Н.И., Юдаев В.Ф.* Акустическая коагуляция аэрозолей и ее аппаратное оформление. – Москва: Промиздат, 2003. – 232 с.
12. *Temkin S.* Suspension acoustics: An introduction to the physics of suspensions. – New York: Cambridge University Press, 2005. – 400 p.
13. *Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Шалунова К.В., Цыганок С.Н., Барсуков Р.В., Сливин А.Н.* Ультразвуковая коагуляция аэрозолей. – Бийск: АлтГТУ, 2010. – 241 с.
14. *Shaw D.T.* Acoustic agglomeration of aerosols. Chap.13. Recent developments in aerosol sciences. – New York: Wiley Interscience, 1978. P.279-319.
15. *Hoffmann T.L., Koopmann G.H.* Visualization of acoustic particle interaction and agglomeration: Theory and experiments // J. Acoust. Soc. Am. 1996. V.99. №4. Pt.1. P.2130-2141.

16. *Hoffmann T.L., Koopmann G.H.* Visualization of acoustic particle interaction and agglomeration: Theory evaluation // *J. Acoust. Soc. Am.* 1997. V.101. №6. P.3421-3429.
17. *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.137-154.
18. *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: Институт механики и машиностроения КазНЦ РАН, 2001. – С. 19-35.
19. *Гуляев А.М., Кузнецов В.М.* Коагуляция аэрозолей под действием периодических ударных волн // *Акустический журнал.* 1962. Т.8. №4. С.473-475.
20. *Temkin S.* Droplet agglomeration induced by weak shock waves // *Phys. Fluids.* 1970. V.13. P.1639-1641.
21. *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.
22. *Alexeev A., Gutfinger C.* Aerosol deposition in periodic shock waves // *Phys. Fluids.* 2004. V. 16. P.1028-1036.
23. *Temkin S., Kim S.S.* Droplet motion induced by weak shock waves // *J. Fluid Mech.* 1980. V.96. P.137-157.
24. *Temkin S., Ecker G.Z.* Droplet pair interactions in a shock-wave flow field // *J. Fluid Mech.* 1989. V.202. P.467-497.
25. *Gubaidullin D.A. Zaripov R.G., Galiullin R.G., Galiullina E.R.* Aerosol coagulation on nonlinear oscillations in a closed tube // Abstract of III Int. Conf, on Modelling and Experimental Measurements in Acoustics. Cadiz, Spain, June 16 – 18, 2003. P.171-177.
26. *Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Галиуллин Р.Г., Галиуллина Э.Р.* Нелинейные колебания аэрозоля в закрытой трубе // *Известия вузов. Проблемы энергетики.* 2002. №11-12. С.3-8.
27. *Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Галиуллин Р.Г., Ткаченко Л.А.* Нелинейные колебания аэрозоля в полукоткрытой трубе // *Известия вузов. Проблемы энергетики.* 2003. №11-12. С.3-8.
28. *Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Галиуллин Р.Г., Галиуллина Э.Р., Ткаченко Л.А.* Нелинейные колебания аэрозоля в трубе // Темати-

ческий сборник «Динамика газовых пузырьков и аэрозолей». ИММ КазНЦ, ИМ УНЦ РАН. Уфа. 2003. С.287-307.

29. 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. С.788-795.
30. Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Галиуллин Р.Г., Ткаченко Л.А. Влияние начальной концентрации аэрозоля на процесс коагуляции при нелинейных колебаниях в трубе // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2004. №7-8. С.3-9.
31. Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Галиуллин Р.Г., Ткаченко Л.А. Влияние начальной концентрации аэрозоля на процесс осаждения в закрытой трубе // Актуальные проблемы механики сплошной среды. К 70-летию чл.-корр. РАН М.А. Ильгамова, 2004. С.24-35.
32. Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Галиуллин Р.Г., Ткаченко Л.А. Влияние начальной концентрации аэрозоля на процесс коагуляции в резонансной трубе // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. Вып.16. Надежность и ресурс в машиностроении. Н. Новгород: Изд-во ФГОУ ВПО «ВГАВТ», 2006. С.52-61.
33. Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Пятеркин А.Ю., Ткаченко Л.А., Тукмаков А.Л. Динамика частиц при нелинейных колебаниях газозвесей в трубах // Аннотации докладов IX Всероссийского съезда по теоретической и прикладной механике. Н. Новгород, 22 – 28 августа 2006. Т.2. С.67.
34. Gubaidullin D.A., Zaripov R.G., Tukmakov A.L., Tkachenko L.A. Dynamics of aerosols at nonlinear oscillations in tubes. The theory and experiment // Abstracts of the European Aerosol Conference. Karlsruhe, Germany, September 6 – 11, 2009. [Электронный ресурс]. <http://www.gaef.de/EAC2009/EAC2009abstracts/T07Fundamentals/All abstracts T07.pdf>.
35. Gubaidullin D.A., Zaripov R.G., Tukmakov A.L., Tkachenko L.A. Dynamics of aerosols at oscillations near to resonant frequencies in tubes with various geometry on the end // Abstract of International Aerosol Conference, Finland, Helsinki, August 29 – September 3, 2010. [Электронный ресурс]. <http://www.atm.helsinki.fi/IAC2010/abstracts/pdf/698.pdf>.

36. Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Ткаченко Л.А. Нелинейные колебания мелкодисперсного аэрозоля в трубе с фланцем // ИФЖ. 2011. (в печати).
37. Сонин Н.В. Экспериментальное исследование ускоренной коагуляции аэрозоля при субгармоническом резонансе в закрытой трубе // Известия вузов. Авиационная техника. 2004. №2. С.76-78.
38. Сонин Н.В. Особенности ускоренной коагуляции аэрозоля при субгармоническом резонансе в открытой трубе // Известия вузов. Авиационная техника. 2008. №1. С.74-76.
39. Fichman M., Gutfinger C., Pnueli D. A model of turbulent deposition of aerosols // J. Aerosol Sci. 1988. V.19. №1. P.123-136.
40. Li A., Ahmadi G. Deposition of aerosols on surfaces in a turbulent channel flow // International Journal of Engineering Science. 1993. V.31. № 3. P.435-451.
41. Chen Q., Ahmadi G. Deposition of particles in a turbulent pipe flow // Journal of Aerosol Science. 1997. V.28. № 5. P.789-796.
42. Dain Y., Fichman M., Gutfinger C., Pnueli D., Vainshtein P. Dynamics of suspended particles in a two-dimensional high-frequency sonic field // J. Aerosol Sci. 1995. V.26. №4. P.575-594.
43. Goldshtein A., Shuster K., Vainshtein P., Fichman M., Gutfinger C. Particle motion in resonance tubes // J. Fluid Mech. 1998. V.360. P.1-20.
44. Alexeev A., Gutfinger C. Particle drift in a resonance tube – a numerical study // J. Acoust. Soc. Am. 2003. V.114. № 3. P.1357-1365.
45. Vainshtein P., Fichman M., Pnueli D. On the drift of aerosol particles in sonic fields // J. Aerosol Sci. 1992. V.23. P. 631-637.
46. Temkin S. Gasdynamic agglomeration of aerosols. 1. Acoustic waves // Phys. Fluid. 1994. V.6. P.2294-2303.
47. Тукмаков А.Л. Динамика твердых частиц в волновом поле трубопровода с акустически закрытым концом // Известия вузов. Авиационная техника. 2005. № 2. С.30-33.
48. Тукмаков А.Л. Распределение твердых частиц в акустическом поле резонансной трубы при различных режимах возбуждения колебаний // Теплофизика и аэромеханика. 2005. № 2. С.219-227.
49. Губайдуллин Д.А., Тукмаков А.Л. Движение твердых сферических частиц в волновом поле акустического резонатора // Актуальные проблемы механики сплошной среды. К 15-летию ИММ КазНЦ РАН. Казань: Изд-во КГУ, 2006. С.50-60.

50. *Тукмаков А.Л.* Численное моделирование акустических течений при колебаниях газа в закрытой трубе в окрестности резонансных частот // Известия вузов. Авиационная техника. 2006. №4. С.30-33.
51. *Тукмаков А.Л., Губайдуллин Д.А.* Численное моделирование движения твердых частиц в нелинейном волновом поле акустического резонатора // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2008. №3-4. С.3-13.
52. *Зарипов Р.Г., Тукмаков А.Л.* Экспериментальное и численное исследование дрейфа твердых частиц при резонансных колебаниях газов в закрытой трубе // Научно технический и теоретический журнал «Нелинейный мир». 2009. Т.7. № 7. С.541-549.
53. *Тукмаков А.Л.* Численное моделирование процесса волновой сепарации твердых частиц при резонансных колебаниях газа в закрытой трубе // Акустический журнал. 2009. Т.55. №2. С.342-349.
54. *Тукмаков А.Л.* Численное моделирование дрейфа твердых частиц при резонансных колебаниях газа в открытом канале // Акустический журнал. 2009. Т.55. №3. С.247-255.
55. *Тукмаков А.Л.* Численное моделирование колебаний монодисперсной газозвеси в нелинейном волновом поле // Прикладная механика и техническая физика. 2011. Т.52. №2 (в печати).
56. *Тукмаков А.Л.* Зависимость механизма дрейфа твердой частицы в нелинейном волновом поле от ее постоянной времени и длительности волновых фронтов // Прикладная механика и техническая физика. 2011. Т.52. №4 (в печати).
57. *Губайдуллин Д.А., Осипов П.П.* Влияние гидродинамических сил на дрейф включений в волновых полях // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2010. № 1-2. С. 3-13.
58. *Губайдуллин Д.А., Осипов П.П.* О некоторых режимах дрейфа включений в акустических полях // ИФЖ. 2011. (в печати).
59. *Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Галиуллин Р.Г., Ткаченко Л.А., Пятеркин А.Ю.* Движение частицы при нелинейных колебаниях газа в закрытой трубе // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2005. №7-8. С.21-26.
60. *Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Галиуллин Р.Г., Ткаченко Л.А., Пятеркин А.Ю.* Динамика твердой частицы при продольных колебаниях газа в трубе // Актуальные проблемы механики сплошной среды. К 15-летию ИММ КазНЦ РАН. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 2006. С.36-49.

61. Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Галиуллин Р.Г., Ткаченко Л.А. Дрейф частицы при продольных колебаниях газа в открытой трубе // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2007. №9-10. С.3-9.
62. Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Галиуллин Р.Г., Ткаченко Л.А., Пяттеркин А.Ю. Дрейф твердой частицы при продольных колебаниях газа в трубе // Научно технический и теоретический журнал «Нелинейный мир». 2008. Т.6. №5-6. С.334-342.
63. Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Галиуллин Р.Г., Ткаченко Л.А., Шульга И.А. Дрейф сферической частицы вдоль оси закрытой трубы при продольных колебаниях газа // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2008. №7-8. С.3-8.
64. Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Галиуллин Р.Г., Ткаченко Л.А. Движение сферической частицы при продольных колебаниях газа в открытой трубе // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2010. №9-10. С.15-21.
65. Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Галиуллин Р.Г., Ткаченко Л.А., Пяттеркин А.Ю. Динамика частицы в пристеночной области трубы при акустическом воздействии колебаний газа // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2008. №1-2. С.3-10.
66. Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Галиуллин Р.Г., Ткаченко Л.А., Шульга И.А. Поведение сферических частиц с различными геометрическими и физическими параметрами при колебаниях газа в трубе // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2009. №5-6. С.3-9.
67. Capéran Ph., Somers J., Richter K., Fourcaudot S. Acoustic agglomeration of a glycol fog aerosol: Influence of particle concentration and intensity of the sound field at two frequencies // Journal of Aerosol Science. 1995. V.26. №4. P.595-612.
68. Somers J., Capéran Ph., Richter K., Fourcaudot S. Acoustic agglomeration of titanium dioxide in the presence of stationary droplets as a function of the wave energy // Journal of Aerosol Science. 1995. V.26. №8. P.1317.
69. Liu J., Zhang G., Zhou J., Wang J., Zhao W., Cen K. Experimental study of acoustic agglomeration of coal-fired fly ash particles at low frequencies // Powder Technology. 2009. V.193. №1. P.20-25.
70. Sheng Ch, Shen X. Simulation of acoustic agglomeration processes of poly-disperse solid particles // Aerosol Science and Technology. 2007. V.41. №1. P.1-13.