

На правах рукописи

Шайдуллин Линар Радикович

НЕЛИНЕЙНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ГАЗА И АЭРОЗОЛЯ В ТРУБАХ ВБЛИЗИ
РЕЗОНАНСА

01.02.05 - механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Казань – 2019

Работа выполнена на кафедре технической физики и энергетики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет» и в Институте механики и машиностроения - обособленном структурном подразделении Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»

Научный руководитель: Губайдуллин Дамир Анварович,
доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН

Научный консультант: Кашапов Наиль Фаикович,
доктор технических наук,
профессор, член-корреспондент АН РТ

Официальные оппоненты: Осипцов Александр Николаевич,
доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий лабораторией
Института механики МГУ им. М. В. Ломоносова
(г. Москва)

Репина Анастасия Владимировна,
кандидат технических наук, доцент кафедры
физики, Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Казанский национальный
исследовательский технологический
университет» (г. Казань)

Ведущая организация: Тюменский филиал Федерального
государственного бюджетного учреждения
науки Института теоретической и прикладной
механики им. С.А. Христиановича Сибирского
отделения Российской академии наук

Защита состоится 30 августа 2019 г. в 11 час. 00 мин. в аудитории 610 второго корпуса КФУ на заседании диссертационного совета Д 212.081.11 при ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 35.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке им. Н. И. Лобачевского Казанского федерального университета и на сайте ФГАОУ ВО КФУ <http://kpfu.ru>.

Автореферат разослан « __ » _____ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Саченков А. А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Развитие современной техники создает новые задачи, среди которых можно отметить изучение резонансных режимов колебаний среды в различных аппаратах энергомашиностроения, промышленности. Особый интерес представляет трубопроводная система, один конец которой закрыт или сообщается с окружающей средой. Поршень на другом конце создает колебания с определенной частотой и амплитудой. Возбуждение газа в таких системах вблизи резонансов приводит к возникновению нелинейных волн давления, и наблюдаются различные эффекты, такие как турбулизация потока, вторичные и акустотермические течения, увеличиваются местные коэффициенты теплоотдачи, что может привести к разрушению трубопровода. При этом нелинейные резонансные колебания могут сильно интенсифицировать горение, повышать теплонапряженность, улучшать тепло- и массообмен, снижать гидравлическое сопротивление.

Одним из важных и практических приложений исследований многофазных сред является осаждение аэрозолей на ограничивающих поверхностях при воздействии нелинейных колебаний в различных технических устройствах. В научно-исследовательских и технических отраслях представляется сложным процесс удаления мелкодисперсных аэрозолей в отходящих газах промышленного происхождения, образовавшихся при переработке различного сырья и обработке металлов, процессах кислотного и щелочного травления, сжигании или измельчении твердых тел [Хмелев В. Н. и др., 2010]. Также, активно развиваются технологии аэродинамической фокусировки частиц, например, с целью фракционирования аэрозолей [Осипцов А. Н., Рыбдылова О. Д. Теоретические основы химической технологии, 2011]. Применение акустического осаждения аэрозолей в различных устройствах позволит интенсифицировать данные процессы, поэтому исследование динамики аэрозоля в трубе с периодическим возбуждением среды в резонансных режимах является актуальным.

Целью диссертационной работы является теоретическое и экспериментальное исследование динамики газа и аэрозоля в открытой и закрытой трубах вблизи резонанса в режиме перехода к ударным волнам и безударно-волновом режиме при колебаниях различной интенсивности.

Для достижения цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Изучение влияния интенсивности возбуждения на форму волны давления газа безударно-волнового течения в закрытой трубе вблизи резонансной частоты.
2. Экспериментальное исследование осаждения мелкодисперсного аэрозоля при колебаниях в закрытой трубе в безударно-волновом режиме при переходе через резонансную частоту.

3. Изучение процесса дрейфа частицы во времени на различных сечениях открытой трубы и во внешнем волновом поле при колебаниях в широком диапазоне частот и амплитуд возбуждения газа в безударно-волновом режиме.

4. Теоретическое и экспериментальное исследование нелинейных колебаний газа в режиме перехода к ударным волнам при малых амплитудах возбуждения (до 0.02 бар) в открытой трубе вблизи резонанса.

5. Изучение динамики аэрозоля в закрытой и открытой трубах под действием волнового поля в переходном режиме в широком диапазоне амплитуд и частот возбуждения газа.

Новым в работе является следующее:

1. Изучено влияние интенсивности возбуждения на нелинейные колебания давления газа при безударно-волновом течении в закрытой трубе при малых амплитудах возбуждения (0.01 бар) и в широком диапазоне частот.

2. Получены экспериментальные данные о движении частицы и аэрозоля при продольных колебаниях газа в открытой трубе на первой собственной частоте, которые дополняют сведения о влиянии на них волнового поля при безударно волновом режиме колебаний.

3. Получено аналитическое решение и экспериментальные данные для вынужденных продольных колебаний газа в режиме перехода к ударным волнам в открытой трубе. Приводится сравнение теоретических и опытных данных.

4. Исследована волновая динамика и осаждение аэрозоля в широком диапазоне амплитуд и частот возбуждения в режиме перехода к ударным волнам в открытой и закрытой трубах.

Методы исследования. Исследования проводились на созданных экспериментальных установках на основе электродинамических вибростендов фирмы TiraVib с комплексом современного высокоточного оборудования. Теоретическая модель рассматривала систему гидродинамических уравнений, описывающих движение вязкого теплопроводного газа, включающую в себя уравнения движения, неразрывности, энергии и состояния, решения которых искалась методом возмущений в первом акустическом приближении.

Достоверность результатов обеспечивается непротиворечивостью полученных результатов фундаментальным положениям теории акустики, подтверждением основных выводов работы экспериментальными результатами.

На защиту выносятся:

1. Результаты исследований колебаний газа в режиме перехода к ударным волнам и динамика аэрозоля в открытой и закрытой трубах.

2. Решение системы уравнений, описывающих нелинейные колебания газа в режиме перехода к ударным волнам в открытой трубе.

3. Результаты исследований колебаний газа в безударно-волновом режиме испытаний и их влияния на поведение аэрозоля в закрытой трубе.

4. Результаты исследований поведения частицы на оси в открытой трубе и в её внешнем волновом поле в безударно-волновом режиме колебаний.

Теоретическая и практическая значимость. Результаты аналитических расчетов дают более полное представление о вынужденных продольных колебаниях газа в открытой трубе в переходном к ударным волнам режиме. Экспериментальные данные показывают, что под действием волнового поля происходит укоренное осаждение аэрозоля, и результаты могут быть использованы для очистки отходящих газов в промышленности.

Основные положения и результаты работы используются при проведении практических занятий и помогают студентам в выполнении выпускных квалификационных работ на кафедре технической физики и энергетики Казанского Федерального Университета.

Апробация работы. Основные положения и результаты научной квалификационной работы докладывались и обсуждались на Всероссийских и международных научно-технических конференциях, съездах, семинарах: международных научно-технических конференциях «Низко-температурная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий» (г. Казань, 2012–2018 гг.), международных молодёжных конференциях ФизикА.СПб (ФТИ им. А. Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург 2015, 2017 гг.), Российских с международным участием итоговых научных конференций 2015-2017 гг. академических институтов (КазНЦ РАН, г. Казань), X школе-семинаре молодых ученых и специалистов академика В.Е. Алемасова «Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении» (КазНЦ РАН, г. Казань, 2016), Российской с международным участием X научной конференции «Нелинейные колебания механических систем» им. Ю.И. Неймарка (НГУ им. Н.И. Лобачевского г. Нижний Новгород, 2016 г.), XII Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (КГЭУ, г. Казань, 2017), Всероссийская конференции «Физика низкотемпературной плазмы» ФНТП-2017 (КФУ, г. Казань, 2017 г.), XIII Международной конференция «Газоразрядная плазма и её применение» (г. Новосибирск, 2017 г.), Конференции молодых ученых «Молодежь и инновации Татарстана» (г. Казань, 2018 г.), научно-техническом семинаре кафедры «Техническая физика и энергетика» КФУ (г. Казань, 2018 г.).

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в 27 печатных работах, из них 10 статей в журналах, индексируемых международными базами данных SCOPUS и Web of Science, и входящих в перечень ВАК, и 17 публикаций в материалах Всероссийских и международных научных конференциях.

Личный вклад автора заключается в совместной с научным руководителем и консультантом постановке исследуемых задач. В разработке методик и реализации экспериментов, а также анализе и интерпретации полученных результатов.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 3 глав, заключения, списка использованных источников информации. Работа содержит 117 страниц текста, 51 рисунков. Список использованных источников информации включает 174 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы и приведена её общая характеристика.

Первая глава посвящена обзору работ резонансных режимов нелинейных колебаний газа и сопровождающих их газодинамических процессов и формулировке цели и задач исследования.

Во второй главе выполнено теоретическое и экспериментальное исследование нелинейных колебаний газа в режиме перехода к ударным волнам при малых амплитудах возбуждения (до 0.02 бар) в трубах вблизи резонансной частоты и рассмотрена динамика аэрозоля под действием акустических полей различной интенсивности.

Для теоретического описания гармонических колебаний газа, возбуждаемые поршнем с амплитудой смещения $l \ll L_0$, в длинной цилиндрической трубе ($L_0/R \gg 1$) использовалась система уравнений гидродинамики в виде

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial r} \right) &= - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right), \quad \frac{\partial p}{\partial r} = 0, \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\rho}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv) + v \frac{\partial \rho}{\partial r} &= 0, \\ \rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial r} \right) &= \frac{\lambda}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2, \\ p &= \rho R_g T. \end{aligned} \quad (1)$$

При слабой внутритрубной нелинейности ($\varepsilon = V/\omega L_0 \ll 1$) решения уравнений (1) находились методом возмущений в виде $u = \varepsilon u_1 + \varepsilon^2 u_2$, $v = \varepsilon v_1 + \varepsilon^2 v_2$, $p = p_0 + \varepsilon p_1 + \varepsilon^2 p_2$, $\rho = \rho_0 + \varepsilon \rho_1 + \varepsilon^2 \rho_2$, $T = T_0 + \varepsilon T_1 + \varepsilon^2 T_2$. Решая уравнения первого (акустического) приближения

$$\begin{aligned} \rho_0 \frac{\partial u_1}{\partial t} &= - \frac{\partial p_1}{\partial x} + \frac{\mu}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_1}{\partial r} \right), \quad \frac{\partial p_1}{\partial r} = 0, \\ \frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \rho_0 \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\rho_0}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_1) &= 0, \\ \rho_0 c_p \frac{\partial T_1}{\partial t} &= \frac{\lambda}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + \frac{\partial p_1}{\partial t}, \\ p_1 &= \rho_1 R_g T_0 + \rho_0 R_g T_1. \end{aligned} \quad (2)$$

с учетом граничных условий на стенке и на оси трубы

$$\begin{aligned}
u_1 = 0, \quad v_1 = 0, \quad T_1 = 0, \quad r = R, \\
\frac{\partial u_1}{\partial r} = 0, \quad v_1 = 0, \quad \frac{\partial T_1}{\partial r} = 0, \quad r = 0,
\end{aligned} \tag{3}$$

были получены выражения для колебаний давления, осевой и радиальной скоростей и плотности газа

$$\begin{aligned}
p_1 &= \rho_0 c_0^2 r_1 \cos(k_1 x + \alpha_1 + i\beta_1) e^{i(\omega t + \psi_1)}, \\
u_1 &= r_1 c_0 \sin(k_1 x + \alpha_1 + i\beta_1) e^{i(\omega t + \psi_1 - \pi/2)} \left\{ 1 - e^{[-(1+i)\eta]} \right\}, \\
v_1 &= \frac{(1+i)\omega\delta}{2} r_1 \cos(k_1 x + \alpha_1 + i\beta_1) \times \\
&\times \left\{ \left(1 + \frac{\kappa-1}{\sqrt{\text{Pr}}} \right) \frac{r}{R} - e^{[-(1+i)\eta]} - \frac{\kappa-1}{\sqrt{\text{Pr}}} e^{[-(1+i)\eta\sqrt{\text{Pr}}]} \right\} e^{i(\omega t + \psi_1)}, \\
\rho_1 &= \rho_0 r_1 \cos(k_1 x + \alpha_1 + i\beta_1) \left\{ 1 + (\kappa-1) e^{[-(1+i)\eta\sqrt{\text{Pr}}]} \right\} e^{i(\omega t + \psi_1)}.
\end{aligned} \tag{4}$$

Находились осредненные по сечению трубы соотношения для колебаний давления и скорости газа на первой гармонике. В безразмерном виде они имели следующий вид

$$\begin{aligned}
\bar{p}_1 &= r_1 \cos(k_1 x + \alpha_1 + i\beta_1) e^{i(\omega t + \psi_1)}, \\
\bar{u}_{1s} &= -ir_1 \sin(k_1 x + \alpha_1 + i\beta_1) e^{i(\omega t + \psi_1)},
\end{aligned} \tag{5}$$

где $\bar{p}_1 = p_1 / \rho_0 c_0^2$, $\bar{u}_{1s} = u_{1s} / c_0$, $k_1 = \frac{\omega}{c_0} (1 + \beta'_1 - i\beta'_1)$. При высокочастотных колебаниях (когда акустический пограничный слой δ занимает лишь тонкий пристеночный слой трубы) индекс s опускалось, так как амплитуда осредненной скорости мало отличается от максимальной в данном сечении амплитуды $\bar{u}_1$, т.е. $\bar{u}_{1s} = \bar{u}_1$.

Для определения констант r_1 , ψ_1 , α_1 , β_1 соотношения (5), (6) подставлялись в граничные условия на поршне

$$\bar{u}_{1p} = M_p e^{i\omega t}, \quad x = 0 \tag{7}$$

и на открытом конце трубы [16]

$$\bar{p}_{1E} = m r_1^2 e^{i(\omega t + \psi_1)}, \quad x = L, \tag{8}$$

где $m = \frac{2}{3\pi} (1 + k_{in})$ содержит параметр k_{in} , который был определен экспериментально [Sturtevant B.B., Keller J., Z. Angew. Math. Phys., 1978] и зависел от формы открытого конца трубы и для конца с фланцем под прямым углом и равен 1.66.

Тогда при $\beta_1 \ll 1$ получим равенства

$$\alpha_1 = \frac{\pi}{2} - k_0 L (1 + \beta'_1), \quad \beta_1 = k_0 L \beta'_1 + m r_1, \quad (9)$$

$$r_1 \sqrt{\cos^2 [k_0 L (1 + \beta'_1)] + (k_0 L \beta'_1 + m r_1)^2 \sin^2 [k_0 L (1 + \beta'_1)]} = M_p, \quad (10)$$

$$\psi_1 = \arctg \left(\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\beta_1} \right), \quad (11)$$

где

$$\beta'_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(1 + \frac{\kappa - 1}{\sqrt{Pr}} \right) \frac{1}{R} \sqrt{\frac{\mu}{\rho_0 \omega}}. \quad (12)$$

На рис. 1 приводятся теоретические зависимости и экспериментальные данные для безразмерного размаха колебаний давления газа $\Delta \bar{p} = (\Delta p / p_0) \times 10^2$ (p_0 – атмосферная давление $\Delta p = p_2 - p_1$, p_2 и p_1 есть максимальное и минимальное значение давления за период колебаний поршня) от относительной частоты возбуждения $\bar{\nu} = \nu / \nu_1$ (ν_1 – резонансная частота) для заданных значений относительной амплитуды смещения поршня $\bar{l} = 10^4 \cdot l / L_0$ (l – амплитуда смещения поршня, L_0 – длина трубы). В условиях, 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. Первая ($n = 1$) собственная (фундаментальная) частота ν_1 , для открытой трубы равна 182 Гц и 90.3 Гц для закрытой трубы. Точечной линией отмечено отношение резонансной частоты возбуждения газа, рассчитанной по линейной теории $\nu_1 = c_0 / 2L$ к резонансной частоте, полученной при наличии пристеночных потерь $\nu_1^* = c_0 / 2L(1 + \beta'_1)$. Штриховой линией – отношение ν_1^3 к ν_1^* . Значение частоты $\nu_1^* = 90.3$ Гц, совпадает с наблюдаемым в экспериментах значением ν_1^3 . Наличие пристеночных потерь приводит к снижению наблюдаемой в экспериментах частоты относительно частоты $\nu_1 = 90.6$ Гц, рассчитанной по линейной теории.

Результаты теоретических расчетов по рассматриваемой модели резонансных колебаний газа согласуются с полученными экспериментальными данными. При этом можно отметить, что размах колебаний давления газа в режиме перехода к ударным волнам примерно в три раза выше, чем размах колебаний давления газа в безударно-волновом режиме при одинаковых амплитудах смещения поршня, а сдвиг частоты при учете пристеночных потерь меньше. Это связано с тем, что хотя в обоих случаях пристеночные потери велики по сравнению с потерями на сжатие газа в нелинейных волнах, при колебаниях в трубе с большим радиусом R , в соответствии с (12), диссипативные потери β'_1 ниже, чем при колебаниях в более узких трубах.

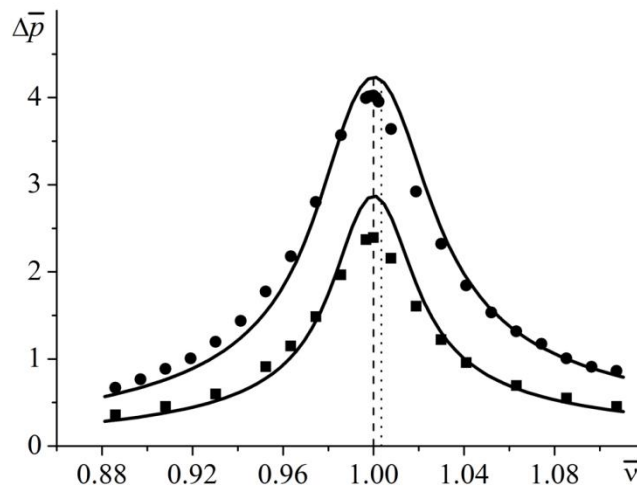


Рис. 1. Зависимость $\Delta \bar{p}$ от $\bar{v}$. Точки: $\bullet$ – $\bar{l} = 7.9$, $\blacksquare$ – $\bar{l} = 3.95$ – экспериментальные данные. Сплошные линии – теория.

Теоретические зависимости и экспериментальные данные для безразмерного размаха колебаний давления газа $\Delta \bar{p}$ от относительной амплитуды смещения поршня $\bar{l}$ для наблюдаемой резонансной частоты ν_1^3 представлены на рис. 2. Рост $\bar{l}$ приводит к увеличению значения $\Delta \bar{p}$, что

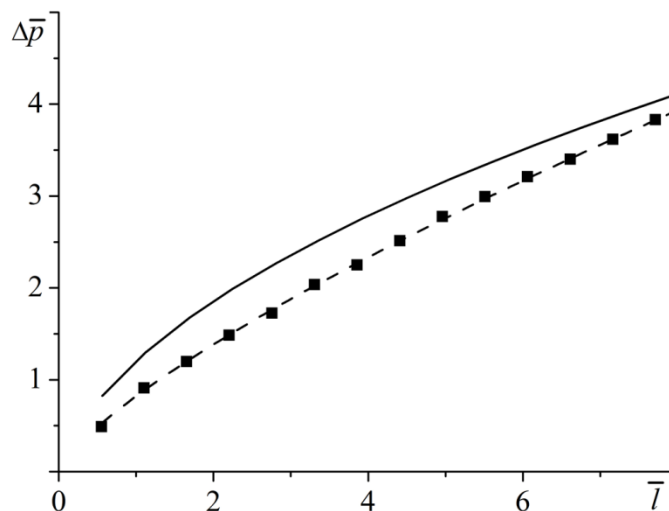


Рис. 2. Зависимость $\Delta \bar{p}$ от $\bar{l}$ на первой наблюдаемой собственной частоте. Точки – экспериментальные данные, сплошная линия – теория, штриховая линия – степенная аппроксимация.

согласуется с известными результатами, где зависимость безразмерного размаха колебаний давления в общем виде определяется аппроксимацией $\Delta \bar{p} = Al^n$, а данные настоящего эксперимента дают значение $n \approx 0.75$. Как видно из рис. 2, полученные экспериментальные данные лежат несколько ниже, чем результаты теоретического расчета колебаний давления газа, что объясняется влиянием нелинейности в резонансом режиме колебаний. Расхождение составляет около 5-15 % во всем диапазоне исследуемых амплитуд смещения поршня.

Экспериментальные исследования проводились на новой установке (рис. 3), на базе виброгенератора 1 марки TIRAvib S5220/LS (Дания) с усилителем мощности модели ВАА 1000-ЕТ и охлаждающим вентилятором. На стол виброгенератора закреплялся стержень, который приводил в движение плоский поршень 3 диаметром равным 0.1 м. Поршень совершал колебания в цилиндре, который соединялся с кварцевой трубой 5 длиной $L_0 = 0.938$ м и внутренним диаметром $2R = 0.1$ м. Пассивный конец трубы с фланцем под прямым углом сообщался с окружающей средой. Измерения и контроль над синусоидальными колебаниями осуществлялись при помощи специального программного обеспечения VibrationVIEW, установленного на компьютер 10, посредством пьезоэлектрического IEPЕ акселерометра 2 марки 4513-001 фирмы Bruel and Kjaer (Дания) и контроллера 11 типа VR9500 фирмы Vibration Research Corporation (США). Значения частоты ν и амплитуды смещения поршня l задавались с точностью до 10^{-6} Гц и 10^{-7} м соответственно.

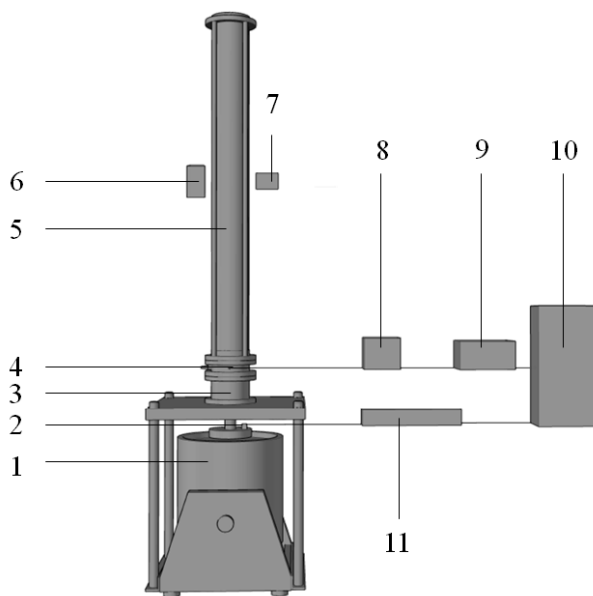


Рис. 3. Схема установки для исследования осаждение аэрозоля в трубе. 1 – виброгенератор, 2 – ИЕРЕ акселерометр 4513-001, 3 – поршень с цилиндром, 4 – датчик давления 8530С-15, 5 – труба, 6 – люксметр АТТ-1505, 7 – светодиод, 8 – трехканальный мостовой усилитель напряжения, 9 – цифровой осциллограф DSO 3062A, 10 – компьютер, 11 – контроллер VR9500.

Давление газа измерялось пьезоэлектрическим датчиком 4 модели 8530C-15 фирмы Bruel & Kjaer (Дания) диаметром 5 мм, размещенным вблизи поршня. Сигнал с датчика через трехканальный мостовой усилитель напряжения 8 модели ENDEVCO-136 фирмы Bruel & Kjaer (Дания) подавался на цифровой осциллограф 9 марки DSO 3062A фирмы Agilent Technologies (США). Управление осциллографом, запись формы и значения выходного сигнала через интерфейс RS-232 выполнялось с компьютера при помощи специального программного обеспечения DSO3000 с точностью 10^{-4} бар. Изменение концентрации аэрозоля фиксировалось при помощи системы, состоящей из источника света 7 и цифрового люксметра 6 АТТ-1505 фирмы Актаком.

Для расчета числовой концентрации аэрозоля из полученных с люксметра данных пользуемся соотношением [Губайдуллин Д.А. и др., ТБТ, 2004]:

$$N = 3.5 \times 10^6 (\Phi_t - \Phi_0) / (\Phi_1 - \Phi_0) \text{ см}^{-3}. \quad (13)$$

На рис. 4, видно, что с течением времени числовая концентрация капель уменьшается и данная зависимость характерна для случаев закрытой и открытой трубы. Вторичные течения, образованные двумя тороидальными вихрями для закрытой трубы в верхней и нижней половинах и одного вихря для открытой трубы, вызывают их осаждение на стенках трубы, а также выброс в открытое пространство в случае трубы с открытым концом. Наблюдаемое время изменения числовой концентрации принимаем равным продолжительности осаждения аэрозоля. С увеличением частоты и приближением к резонансу рассматриваемый процесс ускоряется. Дальнейшее увеличение частоты после резонанса приводит к тому, что время коагуляции и осаждения капель снова возрастает. Это связано с тем, что амплитуда колебаний давления среды имеет максимум на резонансной частоте. Увеличение амплитуды колебаний поршня на фиксированной резонансной частоте, ведет к тому, что время осаждения капель уменьшается. Для сравнения исследуемого режима колебаний в закрытой трубе с естественным осаждением аэрозоля на рисунке представлена зависимость числовой концентрации капель аэрозоля от времени при отсутствии возбуждения $\bar{v} = 0$. Отметим, что вид кривой отличается от кривых, полученных для колеблющегося аэрозоля. Наблюдается более плавное уменьшение концентрации капель, где время осаждения значительно выше, чем при наличии колебаний в 2.5-5 раза для закрытой и в 3-18 раз для открытой трубы.

Также, представлены осциллограммы с записями колебаний давления газа во времени при различных относительных частотах возбуждения $\bar{v}$ и относительной амплитуде смещения поршня $\bar{l} = 3.99$. Таким образом, исследовался переход через резонанс вблизи наблюдаемой первой собственной частоты $\nu_1^{\text{зак}} = 182$ Гц и $\nu_1^{\text{отк}} = 90.3$ Гц. Видно, что вдали от резонанса газ колеблется по гармоническому закону. На до-резонансных частотах излом формируется в области разряжения, а после резонанса наблюдается излом в области сжатия. При резонансе амплитуда становится максимальной.

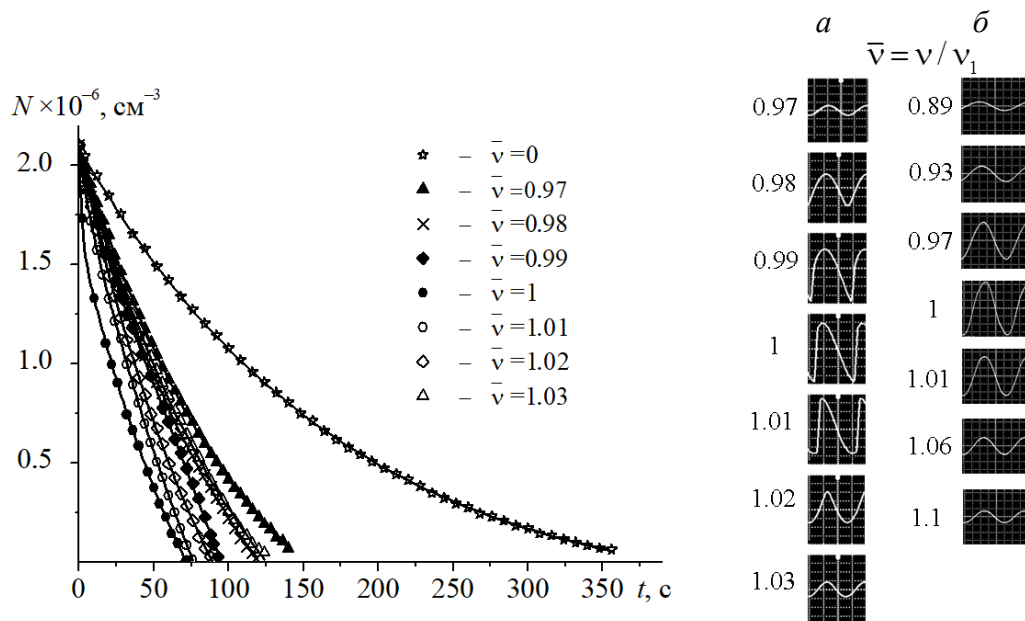


Рис. 4. Зависимости от времени числовой концентрации капель аэрозоля для амплитуды смещения поршня $\bar{l} = 3.73$ при различных значениях частоты возбуждения в закрытой трубе, сплошные линии – экспоненциальные аппроксимации. Осциллограммы колебаний давления газа при $\bar{l} = 3.99$ при различных безразмерных частотах возбуждения $\bar{\nu}$ вблизи первой собственной частоты: а – закрытая труба, б – открытая труба.

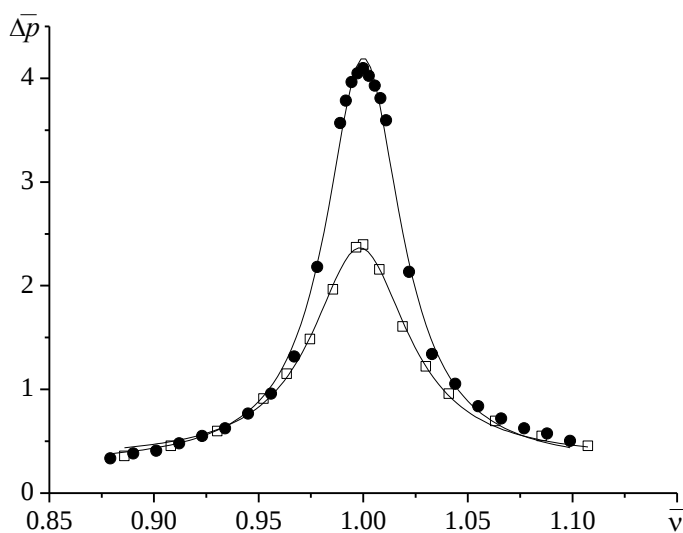


Рис. 5. Зависимость $\Delta \bar{p}$ от $\bar{\nu}$ при амплитуде смещения поршня $\bar{l} = 4.08$. $\square$ – открытая труба ($\nu_1 = 90.3$ Гц), $\bullet$ – закрытая ($\nu_1 = 182$ Гц). Точки эксперимент, сплошная линия – аппроксимация Лоренца.

На рис. 5 представлены зависимости колебаний давления газа $\Delta \bar{p}$ от относительной частоты $\bar{\nu}$ при амплитуде смещения поршня $\bar{l} = 4.08$. Видно, что значение давления в закрытой трубе почти в 2 раза превышает давление для открытой трубы, что связано с потерями на открытом конце. Поскольку для трубы с открытым концом, между газом в трубе и воздухом из прилегающих к открытому концу областей внешней среды происходит непрерывное взаимодействие.

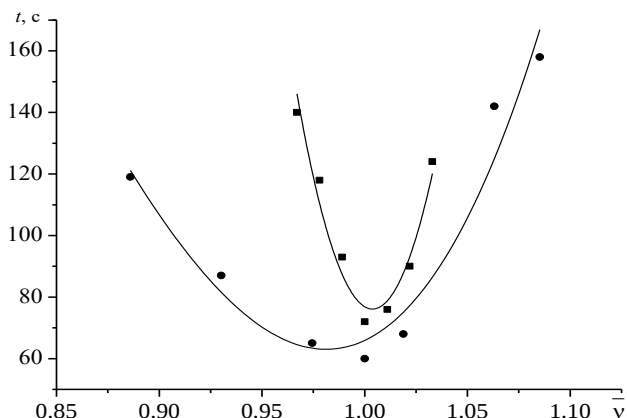


Рис. 6. Сравнение осаждения аэрозоля в • – открытой и ■ – закрытой трубах на резонансных частотах при амплитуде смещения поршня $\bar{l} = 4.08$.

Для сравнения осаждения аэрозоля для открытой и закрытой трубы на резонансных частотах при амплитуде смещения поршня $\bar{l} = 4.08$ был построен общий график на рис. 6, где каждая точка соответствует отдельному эксперименту. С увеличением частоты в до-резонансном режиме колебаний указанное время уменьшается, достигает минимального значения на наблюдаемой резонансной частоте и за резонансом снова увеличивается. Таким образом, наблюдается немонотонный характер зависимости времени осаждения капель аэрозоля от частоты.

В третьей главе изучено влияние интенсивности возбуждения на форму волны давления газа при безударно-волновом течении в закрытой трубе вблизи резонансной частоты и экспериментально исследовано движение частицы при нелинейных колебаниях газа в трубе и во внешнем поле около открытого торца в безударно-волновом режиме, а также особенности осаждения аэрозоля для данных режимов.

Эксперименты проводились на установке, используемой для исследования нелинейных колебаний в безударно волновом режиме, которая далее была модернизирована для изучения движения частицы в горизонтальной плоскости с диаметром и длиной трубы $d = 0.036$ м и $L_0 = 1.06$ м соответственно.

Приведем результаты эксперимента. На рис. 7а даны зависимости числовой концентрации капель аэрозоля от времени для относительной амплитуды хождения поршня $\bar{l} = 2.83$ при заданных значениях частоты возбуждения в закрытой трубе. Видно, что, как и в случае режима перехода к ударным волнам (рис. 4) с течением времени числовая концентрация капель уменьшается. В до-резонансной области зависимости носят пологий характер. С увеличением частоты и приближением к резонансу рассматриваемый процесс ускоряется, и зависимости характеризуются большей кривизной. Дальнейшее увеличение частоты после резонанса ведет к тому, что зависимости снова становятся пологими. Это связано с тем, что амплитуда колебаний давления среды, также имеет максимум на резонансной частоте для закрытой трубы $\nu_1 = 160.66$ Гц (рис.7б). Вдали от резонанса ($\bar{\nu} = 0.96$) колебания аэрозоля

подчиняются гармоническому закону: форма волны давления среды имеет непрерывный и симметричный вид. В резонансе ($\bar{\nu} = 1$) наблюдается незначительная деформация формы волны давления. Увеличивается крутизна переднего фронта. Он имеет длительность 16 мс, в то время как задний фронт – 17 мс. После резонанса ($\bar{\nu} = 1.02$) колебания аэрозоля снова приобретают гармонический вид.

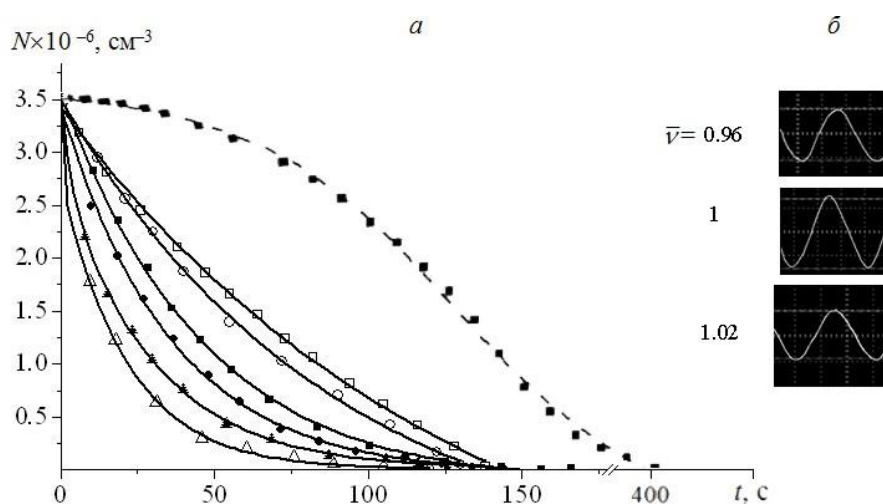


Рис. 7. Зависимости от времени: а – числовой концентрации капель аэрозоля для амплитуды хождения поршня $l = 0,3$ мм при различных значениях частоты возбуждения в закрытой трубе: $\blacksquare$ – $\bar{\nu} = 0.96$, $\bullet$ – $\bar{\nu} = 0.97$, $\blacktriangle$ – $\bar{\nu} = 0.99$, $\triangle$ – $\bar{\nu} = 1$, $\circ$ – $\bar{\nu} = 1.01$, $\square$ – $\bar{\nu} = 1.02$, сплошные линии – экспоненциальные аппроксимации; б – колебаний давления аэрозоля вблизи поршня при переходе через первую собственную частоту.

Для сравнения исследуемого режима с естественным осаждением аэрозоля для данной трубы на рис. 7 представлена зависимость числовой концентрации капель аэрозоля от времени при отсутствии колебаний. Наблюдается медленное уменьшение концентрации капель аэрозоля до некоторого значения. Причем время осаждения капель значительно выше, чем при наличии колебаний и равняется 404 секундам.

Экспериментальное исследование дрейфа частиц проводилось вдоль оси в открытой трубе вблизи резонансной частоты $\bar{\nu}_1 = 78.6$ Гц. Из рис. 8 следует, что частица начинает движение от открытого конца трубы в сторону поршня до определенной точки. Движение частицы, установленной вблизи поршня имеет направление к открытому концу. Такое поведение исследуемых частиц обусловлено наличием акустического течения в виде вихревого движения газа в трубе. При этом движение частицы носит колебательный характер. Она колеблется с частотой $\nu_p = 4$ Гц и амплитудой $l_p = 0.3 \cdot 10^{-3}$ м, значительно меньшими частоты ν и амплитуды l возбуждения газа.

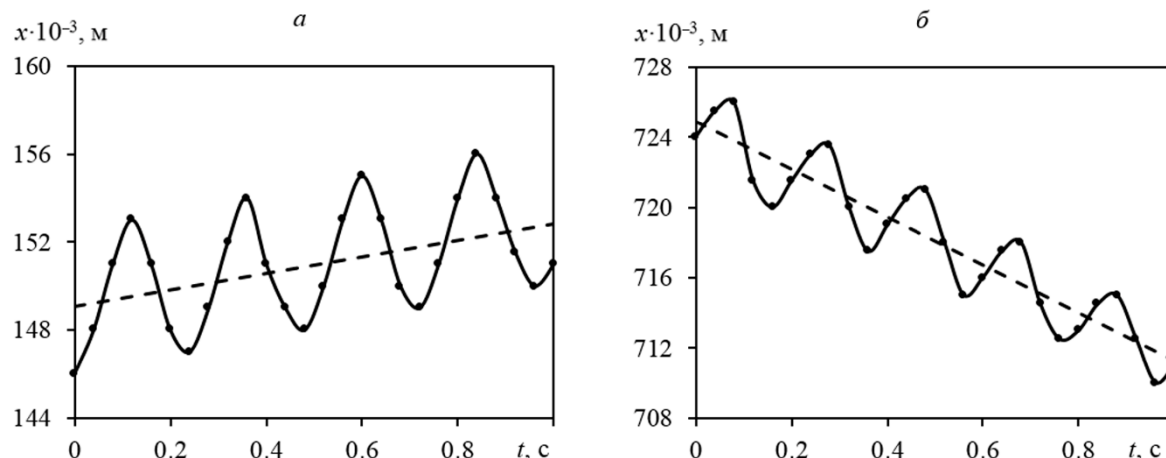


Рис. 8. Зависимость координаты частицы с $m = 5.7$ мг вдоль трубы от времени на резонансной частоте для амплитуды смещения поршня $l = 1.75 \cdot 10^{-3}$ м: (а) вблизи открытого конца, (б) вблизи поршня. Точки – экспериментальные данные, сплошные линии – аппроксимация.

Эксперименты, в которых частица устанавливалась вне трубы на расстоянии 0.3 м от открытого конца рис. 9, показало отсутствие заметных колебаний частицы. Данные позволяют определить скорость дрейфа частицы от открытого конца в направлении вне трубы 0.52 м/с и 0.25 м/с для различных амплитуд смещения поршня $\bar{l} = 16.5$ и $\bar{l} = 14.1$ соответственно. Для сравнения скорость течения газа на оси данной трубы измеренное термоанемометром АТЕ-1004 на расстоянии 28 мм от его торца для амплитуды смещения поршня $\bar{l} = 16.5$, равнялась 0,63 м/с [Ткаченко Л.А., Зарипов Р.Г. Вестник казанского технологического университета, 2014].

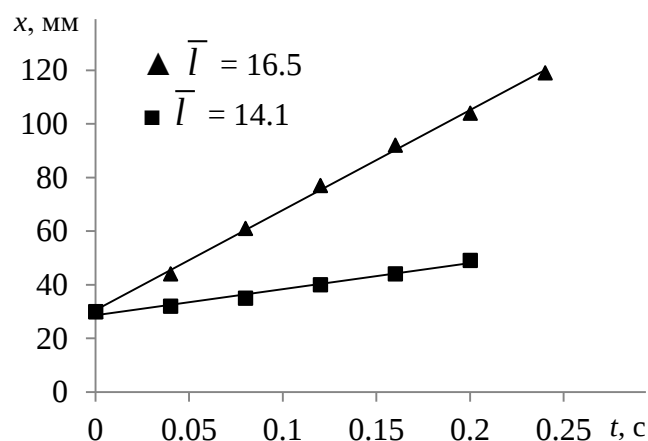


Рис. 9. Зависимость координаты частицы с $m = 4.6$ мг вдоль оси трубы от времени на резонансной частоте на открытом конце вне трубы для различных амплитуд смещения поршня: $\blacktriangle$ – $\bar{l} = 16.5$, $\blacksquare$ – $\bar{l} = 14.1$. Сплошные линии – линейная аппроксимация.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы работы:

1. Выявлены особенности нелинейных колебаний газа в открытой и закрытой трубах в широком диапазоне частот и амплитуд возбуждения вблизи резонансов в безударно-волновом режиме и режиме перехода к ударным волнам. Увеличение амплитуды возбуждения поршня во всех режимах приводит к росту размаха колебаний давления газа. В безударно-волновом режиме форма волны сохраняет гармонический вид как в открытой, так и в закрытой трубе. В режиме перехода к ударным волнам в открытой трубе форма волны давления остается гармонической, а в закрытой трубе - сильно деформируется и становится близка к разрывной.

2. Получено теоретическое решение вынужденных продольных колебаний газа в открытой трубе для малых амплитуд возбуждения, которое хорошо согласуется с полученными экспериментальными данными. Установлено, что в режиме перехода к ударным волнам размах колебаний давления газа в открытой трубе в 3 раза выше, чем в безударно-волновом режиме при равных амплитудах смещения поршня.

3. Показано, что в зависимости от частоты колебания вызывают ускорение осаждения аэрозоля: в режиме перехода к ударным волнам в 2.5 – 5 раз в закрытой трубе и в 3 – 18 раз в открытой трубе, а в безударно-волновом режиме, соответственно, в 2 – 4 раза и 6 – 12 раз по сравнению с естественным осаждением. Зависимость времени осаждения аэрозоля от частоты имеет немонотонный характер с минимумом на первой собственной частоте во всех режимах колебаний.

4. Получено, что время осаждения аэрозоля на резонансной частоте как в закрытой, так и в открытой трубе в режиме перехода к ударным волнам в 1.5 раза меньше, чем в безударно-волновом режиме колебаний при одинаковой амплитуде смещения поршня.

5. Показано, что в полуоткрытой трубе частица, размещенная вблизи поршня, движется к открытому концу, совершая колебания, а частица, размещенная у открытого конца – к поршню. Частота и амплитуда колебаний частицы значительно меньше частоты возбуждения газа, что обусловлено трением об леску и весом частицы. Установлено, что увеличение амплитуды смещения поршня на резонансной частоте приводит к увеличению размаха колебаний частицы, что связано с увеличением интенсивности колебаний. Показано, что вблизи открытого конца во внешнем волновом поле трубы с увеличением амплитуды смещения поршня имеет место увеличение скорости движения частицы. При этом движение частицы от открытого конца вдоль оси трубы происходит практически без колебаний.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованные ВАК:

1. Шайдуллин Л.Р. Экспериментальное исследование коагуляции и осаждения газовзвеси в закрытой трубе при переходе к ударно-волновому режиму / Д. А. Губайдуллин, Р. Г. Зарипов, Л. А. Ткаченко, Л. Р. Шайдуллин // Теплофизика высоких температур. – 2017 – Т. 55, № 3 – С. 484–486. (Shaidullin L.R. Experimental study of coagulation and sedimentation of gas-particle suspension in closed tube under transfer to the shock-wave regime [Text] / D. A. Gubaidullin, R. G. Zaripov, L. A. Tkachenko, L. R. Shaidullin // High Temperature. – 2017. – Vol. 55, № 3. – P. 463–465.)

2. Шайдуллин Л.Р. Динамика аэрозоля в открытой трубе при колебаниях различной интенсивности вблизи резонанса / Д.А. Губайдуллин, Р.Г. Зарипов, Л.А. Ткаченко, Л.Р. Шайдуллин // Теплофизика высоких температур. – 2018 – Т. 56, № 1 – С. 145-147. (Shaidullin L.R. Dynamics of an aerosol in an open tube under oscillations of various intensities near resonance [Text] / D. A. Gubaidullin, R. G. Zaripov, L. A. Tkachenko, L. R. Shaidullin // High Temperature. – 2018. – Vol. 56, № 1. – P. 146-148.)

3. Шайдуллин Л.Р. Динамика табачного дыма при резонансных колебаниях в закрытой трубе / Д.А. Губайдуллин, Р.Г. Зарипов, Л.А. Ткаченко, Л.Р. Шайдуллин // Теплофизика высоких температур. – 2019 – Т. 57, № 2 – С. 312-315. (Shaidullin L. R. Dynamics of tobacco smoke under resonant oscillations in a closed tube [Text] / D. A. Gubaidullin, R. G. Zaripov, L. A. Tkachenko, L. R. Shaidullin // High Temperature. – 2019. – Vol. 57, № 2. – P. 283-285.)

4. Шайдуллин Л.Р. Движение частицы при нелинейных колебаниях газа в открытой трубе в безударно-волновом режиме / Д.А. Губайдуллин, Р.Г. Зарипов, Л.А. Ткаченко, Л.Р. Шайдуллин // Инженерно-физический журнал. - 2015 - Т. 88 - № 4 - С.843-847. (Shaidullin L. R. Motion of a particle during nonlinear gas oscillations through an open pipe in an unstressed-wave regime [Text] / D. A. Gubaidullin, R. G. Zaripov, L. A. Tkachenko, L. R. Shaidullin // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2015. Vol. 88, № 4. – P. 871-876.)

5. Шайдуллин Л.Р. Вынужденные продольные колебания газа в открытой трубе вблизи резонансной частоты возбуждения / Д.А. Губайдуллин, Р.Г. Зарипов, Л.А. Ткаченко, Л.Р. Шайдуллин // Инженерно-физический журнал. - 2017 – Т. 90 – № 6 – С.1537-1542. (Shaidullin L. R. Forced longitudinal oscillations of a gas in an open pipe near the resonance excitation frequency [Text] / R. G. Zaripov, L. A. Tkachenko, L. R. Shaidullin // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2017. – Vol. 90, № 6. – P. 1463-1468.)

6. Shaydullin L.R. Drift of a flat particle at longitudinal oscillations of gas in an open tube / R.G. Zaripov, L.A. Tkachenko, L.R. Shaydullin // Journal of Physics: Conference Series. – 2014. – V. 567, 012042.

7. Shaydullin L.R. Highly non-linear resonance fluctuations of gas in a closed pipe / R.G. Zaripov, N. F. Kashapov, L.A. Tkachenko, L.R. Shaydullin // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – V.669. – 012053.

8. Shaydullin L.R. Experimental investigation of highly non-linear fluctuations of gas of an open pipe in the vicinity resonances / L.R. Shaydullin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – V. 134. – 012022.

9. Shaydullin L.R. Experimental studies for flow velocities of oscillations gas when transiting through resonance in the area of an open end of pipe / D. A. Gubaidullin, N. F. Kashapov, R. G. Zaripov, L. A. Tkachenko, L. R. Shaydullin // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – V.789. – 012017

10. Shaidullin L. R. Experimental studies of resonant nonlinear oscillations of a gas in an open and closed tube / R. G. Zaripov, L. A. Tkachenko, L. R. Shaidullin // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – V.1058. – 012045.

В сборниках трудов конференций:

11. Шайдуллин Л.Р. Нелинейные колебания однородного газа и аэрозоля в открытой трубе в безударно-волновом режиме / Л. Р. Шайдуллин // Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий - III Научно-техническая конференция: сборник статей. – Казань: КНИТУ. – 2012. – С. 79-84.

12. Шайдуллин Л.Р. Экспериментальное исследование нелинейных колебаний газа в трубе при переходе к ударным волнам вблизи резонансов / Л. Р. Шайдуллин // Международная молодёжная конференция ФизикА.СПб. – Санкт-Петербург. – 2015. - С. 260.

13. Шайдуллин Л.Р. Волновое поле у открытого торца трубы при переходе к ударно-волновому режиму // Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении. Материалы X школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова. – Казань. – 2016. – С. 281-282

14. Шайдуллин Л.Р. Нелинейные колебания газа в акустическом резонаторе при переходе к ударным волнам / Р.Г. Зарипов, Л.А. Ткаченко, Л.Р. Шайдуллин // Труды X Всероссийской научной конференции «Нелинейные колебания механических систем». – Нижний Новгород. – 2016. – С. 253–255.

15. Шайдуллин Л. Р. Экспериментальное исследование распределения температуры колеблющегося газа вблизи резонансной частоты в области открытого торца трубы / Л. Р. Шайдуллин, Л. А. Ткаченко // Материалы докладов XII Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» / Казань: Казан. гос. энерг. ун-т. – 2017. – Т. 2. – С. 363-364.

16. Шайдуллин Л.Р. Исследование влияния нелинейных колебаний газа на характеристики дугового разряда / Л.Р. Шайдуллин, Н.Ф. Кашапов // Всероссийская конференция «Физика низкотемпературной плазмы» ФНТП-2017: сборник тезисов. – Казань: Отечество. – 2017. – С. 238.

17. Шайдуллин Л.Р. Экспериментальное исследование распределения температуры у стенки при нелинейных колебаниях газа в закрытой трубе / Л. Р. Шайдуллин // Международная молодёжная конференция Физика.СПб. – Санкт-Петербург. – 2017. – С. 364.

18. Шайдуллин Л.Р. Разработка способа акустической коагуляции и осаждения аэрозоля в закрытой трубе применительно к миниградиентам / Л. Р. Шайдуллин // Конференция молодых ученых «Молодежь и инновации Татарстана». – Казань. – 2018. – С. 51

19. Шайдуллин Л.Р. Экспериментальное исследование осаждения аэрозоля в открытой трубе при резонансных колебаниях различной интенсивности // Волны и вихри в сложных средах: 9-я международная конференция – школа молодых ученых. – Москва: Премиум-проект. – 2018. – С. 175-177.