

Л. А. Ткаченко, Р. Г. Зарипов

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ КОЛЕБЛЮЩЕГОСЯ ГАЗА В ОКРЕСТНОСТИ ОТКРЫТОГО ТОРЦА ТРУБЫ В БЕЗУДАРНО-ВОЛНОВОМ РЕЖИМЕ

Ключевые слова: резонанс, внешнее волновое поле, безударно-волновой режим колебаний, скорость течения газа.

Экспериментально исследовано распределение скорости течения газа во внешнем волновом поле на различных расстояниях от открытого торца трубы при различных амплитудах смещения поршня на первой собственной частоте в безударно-волновом режиме. Вблизи открытого торца трубы формируется ядро потока, размер которого составляет менее 0,7 радиусов струи, что в 2-9 раз меньше, чем в случае колебаний с образованием ударных волн. При увеличении расстояния от открытого торца трубы в 10 раз скорость струи уменьшается в 25 раз. С повышением амплитуды колебаний скорость течения газа возрастает на всех расстояниях от открытого торца трубы.

Keywords: resonance, external field wave, shock-free mode of oscillations, velocity of the flow of gas.

Distribution of velocity of the flow of gas in an external wave field at various distances from the open end of the tube at different amplitudes of displacement of the piston at the first eigenfrequency in a shock-free mode are experimentally investigated. Near the open end of the tube the core of the flow is formed. Its size is less than 0.7 the jet radii that is 2-9 times less than in the case of oscillations with the formation of shock waves. By increase in distance from the open end of the tube by 10 times the velocity of the flow of gas decreases by 25 times. With increase in amplitude of oscillations the velocity of the flow of gas grows at all distances from the open end of the tube.

Введение

Исследования вынужденных продольных нелинейных колебаний газа в открытых трубах вблизи резонансных частот являются актуальными как с точки зрения теории нелинейной акустики, так и практики. При нелинейных колебаниях газа значительно интенсифицируются различные процессы тепло- и массообмена [1]. Недостаточный учет резонансных режимов колебаний рабочей среды при разработке технических устройств может привести к возникновению аварийных ситуаций и к их полному разрушению. В теоретическом плане при исследовании нелинейных колебаний газа в открытой трубе возникают значительные трудности, вызванные различными эффектами нелинейного волнового поля у выходного сечения. Анализ теоретических работ и экспериментальных работ подробно приведен в обзорах [2]. Отметим только экспериментальные исследования с особенностями процессов при резонансных колебаниях газа. Были обнаружены разрывные колебания газа вблизи нелинейных резонансов [3]. Внешнее волновое поле в режиме образования ударных волн исследовалось в работах [4-6]. Показано, что скорость газа в пульсирующей струе во внешнем волновом поле может достигать 150 м/с и выше [4, 5]. Выявлены различные нелинейные эффекты при распространении волн в трубе с концевыми насадками [7]. В первых экспериментах [8] было обнаружено появление вблизи линейного резонанса у открытого торца трубы прерывистой струи и вихревых колец. Процесс движения газа у открытого торца, проходящий за время одного периода, имеет четыре фазы, равные по времени: формирование струи, отделение струи от газового столба в трубе, формирование вихрей и ламинарное втекание газа в полость трубы. Аналогичные визуальные наблюдения дополнили и уточнили картину движения газа. Измерения колебаний мгновенной скорости термоанемометром в осевом и радиальном на-

правлениях в окрестности открытого торца трубы [9, 10] показали, что структура течения газа существенно зависит от соотношения диаметра трубы и диаметра поршня. Для экспериментов с диаметром поршня большим или равным диаметру трубы в фазе истечения струи структура потока аналогична структуре стационарного истечения из трубы. Другая структура течения газа обнаружена при истечении струи в случае, когда диаметр поршня меньше диаметра трубы. Выявлена область с постоянным значением скорости до значения $r/R=0,5$ (R – радиус трубы). Затем происходило увеличение скорости до максимальной величины. Ближе к кромкам трубы наблюдалось резкое уменьшение скорости. Отмечалось, что такое распределение скорости по сечению обусловлено формированием вихрей внутри трубы. Субгармонические резонансы исследовались в работах [3,9-11], измерение средних скоростей газа (в дальнейшем просто скоростей) вне трубы вдоль оси при помощи трубки Пито проводилось в работе [4, 5]. В [12, 13] приводятся результаты теоретического и экспериментального исследования динамического напора пульсирующей струи на открытом торце резонатора в режиме образования ударных волн.

Таким образом, в основном исследовались мгновенные и средние скорости газа внутри трубы и вне ее при больших значениях амплитуд возбуждения (порядка 0,1-0,4 бара) в ударно-волновом режиме, при котором возникали периодические ударные волны. Безударно-волновой режим газа при малых амплитудах возбуждения (порядка 0,01 бар), когда пристеночные потери становятся существенными, изучен недостаточно.

В связи с этим целью настоящей работы является нахождение распределения скорости течения газа во внешнем волновом поле открытой трубы в различных сечениях при различных амплитудах смещения поршня вблизи первой собственной частоты в безударно-волновом режиме.

Условия эксперимента

Продольные колебания создавались в вертикальной кварцевой трубе длиной 1,06 м и внутренним диаметром 0,0365 м при помощи цилиндрического поршня с плоской поверхностью. Поршень приводился в движение при помощи вибростенда марки TV51075 с усилителем мощности марки BAA 120 фирмы TIRA. Измерения и контроль над синусоидальными колебаниями осуществлялись при помощи программного модуля SineVIEW (VR610), установленного на компьютер, посредством пьезоэлектрического ИЕРЕ акселерометра со встроенной электроникой марки 4513-001 фирмы Bruel & Kjaer и контроллера типа VR8500-1 фирмы Vibration Research Corporation. Для измерения скорости течения газа с точностью до 0,01 м/с использовался термоанемометр АТТ-1004 фирмы АКТАКОМ с терморезистором, размещенным в малогабаритной измерительной сенсорной головке зонда на телескопической ручке. Телескопическая ручка прикреплялась к координатнику, что позволяло ей перемещаться вдоль и перпендикулярно пульсирующей струе. Данные с термоанемометра подавались на компьютер через интерфейс RS-232 и обрабатывались специальной программой.

В начале эксперимента сдвигали разъем сенсорной головки, и при помощи координатника устанавливали ее на заданные расстояния от оси трубы r и от торца трубы x . Включали все приборы и выбирали необходимые значения частоты и амплитуды смещения поршня с точностью до 10^{-6} Гц и 10^{-7} м, соответственно. Запускали вибростенд и после того как частота и амплитуда смещения поршня достигали заданного значения, наблюдали выходной сигнал с термоанемометра на виртуальной панели и записывали значения скорости течения газа на компьютер. Далее координатником перемещали телескопическую ручку зонда через каждые 1 мм по направлению к оси трубы. Замеры скорости производили на различных расстояниях в окрестности открытого торца трубы от $r=30,25$ мм до $r=0$. Затем перемещали координатник параллельно оси трубы, удаляя зонд от торца трубы на различные расстояния, и аналогично исследовали распределение скоростей течения газа во внешнем поле на других значениях координаты x . При этом полагали, что положительные значения x соответствуют направлению течения газа во внешнее поле. Значение координаты $x=0$ соответствовало сечению на торце трубы, а значение координаты $r=0$ – оси трубы. Подобные измерения скорости течения газа в различных точках внешнего поля проводились для других частот и амплитуд смещения поршня.

Результаты эксперимента

Приведем результаты экспериментов.

На рис. 1 представлены зависимости скорости течения газа от расстояния r от оси трубы на разных расстояниях от открытого торца трубы. Как видно из рисунка, на малых расстояниях от открытого торца трубы ($x=5$ мм) наблюдается четко выраженное ядро потока с постоянными значениями

скорости газа. На расстоянии $x=14$ мм ядро потока практически исчезает. Причем наблюдается плавное изменение распределения скорости течения газа до значения $v=0,2$ м/с, что связано с рассеянием ядра. Дальнейшее увеличение расстояния приводит к тому, что значения скорости газа от максимальной его величины уменьшаются до $v=0,1$ м/с. Таким образом, увеличение расстояния от открытого торца трубы более 14 мм приводит к тому, что в зависимостях скорости газа от радиальной координаты не наблюдаются постоянные значения. При этом происходят плавные изменения значений скорости. И уже на расстояниях $x=52$ мм имеется лишь незначительное увеличение скорости газа от $v=0,1$ м/с. Сравнение с результатами при режиме с образованием ударных волн, при котором ядро потока составляет 1,5 до 6 радиусов труб, показывает, что ядро потока в безударно-волновом течении составляет менее 0,7 радиуса трубы. Это связано с существенным влиянием диссипативных потерь.

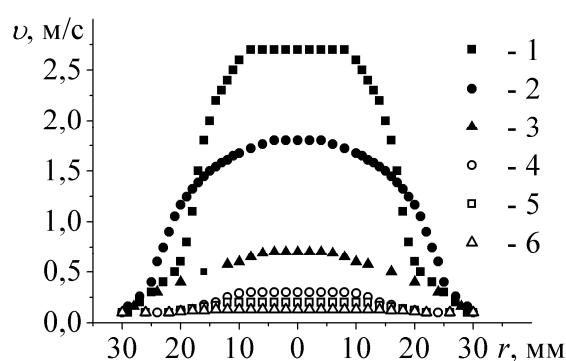


Рис. 1 – Зависимость скорости течения газа от расстояния от оси трубы на первой собственной частоте $\nu_{11} = 78,6$ Гц при амплитуде смещения поршня $l = 1,75$ мм на разных расстояниях от открытого торца трубы: 1 – $x = 5$ мм, 2 – $x = 14$ мм, 3 – $x = 28$ мм, 4 – $x = 42$ мм, 5 – $x = 45$ мм, 6 – $x = 52$ мм

На рис. 2 представлена зависимость скорости течения газа от расстояния r от оси трубы при различных амплитудах смещения поршня. Из рисунка видно, что для всех амплитуд смещения поршня наблюдается рост значений скоростей течения газа до постоянных их значений в ядре потока в области внутри трубы. Увеличение амплитуды смещения поршня приводит к росту значений скорости течения газа. Также отметим, что с увеличением амплитуды возрастание скорости течения газа происходит дальше от стенок трубы. Это связано с вовлечением в движение газа вне трубы. При малом значении амплитуд смещения поршня ($l = 0,75$ мм) рост скорости течения газа близок к линейному. При больших значениях амплитуды ($l = 1,25$ мм и $l = 1,75$ мм) наблюдается нелинейное и плавное увеличение скорости течения газа до ее постоянного значения. Причем постоянные значения внутри струи для всех режимов колебаний поршня практически одинаковы и являются значениями скорости течения в ядре струи. При больших амплитудах

смещения поршня у границы струи наблюдается резкий спад. Во всех экспериментах ядро потока имеет ярко-выраженный характер в виде максимального постоянного значения.

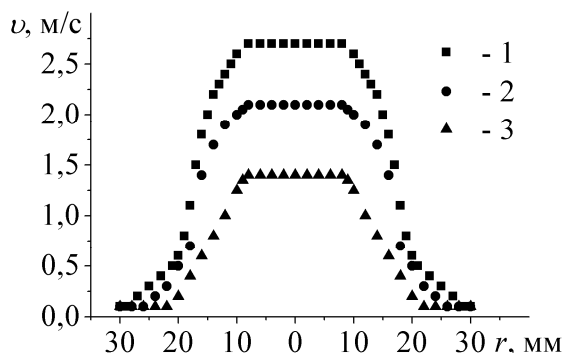


Рис. 2 – Зависимость скорости течения газа от расстояния от оси трубы на первой собственной частоте $\nu_{11} = 78,6$ Гц при расстоянии $x = 5$ мм от торца трубы для различных амплитуд смещения поршня: 1 – $l = 1,75$ мм, 2 – $l = 1,25$ мм, 3 – $l = 0,75$ мм

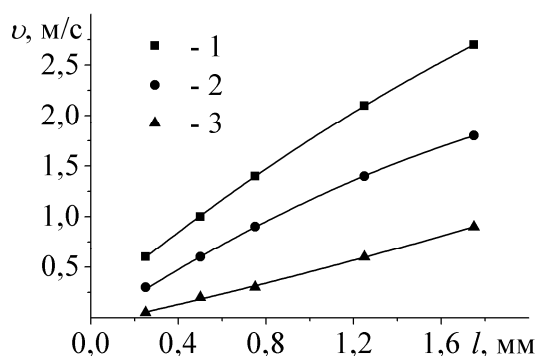


Рис. 3 – Зависимость скорости течения газа на оси трубы от амплитуды смещения поршня на первой собственной частоте $\nu_{11} = 78,6$ Гц при различных расстояниях от торца трубы: 1 – $x = 5$ мм, 2 – $x = 14$ мм, 3 – $x = 28$ мм

На рис. 3 приведены значения скорости течения газа на оси трубы от амплитуды смещения поршня при различных расстояниях от торца трубы. Очевидно, что увеличение амплитуды смещения поршня приводит к росту скорости газа для всех расстояний от открытого торца трубы. При этом на расстоянии $x = 5$ мм от торца трубы наблюдается нелинейный характер возрастания скорости течения газа в 4,5 раз от $v = 0,6$ м/с при амплитуде $l = 0,25$ мм до $v = 2,7$ м/с при амплитуде $l = 1,75$ мм. Дальнейшее увеличение расстояния приводит к тому, что возрастание скорости принимает линейную зависимость от амплитуды смещения поршня.

На рис. 4 представлена зависимость скорости течения вдоль оси трубы от расстояния от открытого торца для различных значений амплитуды смещения поршня. Как видно из рисунка, происходит резкое падение скорости: например, для $l = 1,75$ мм увеличение расстояния в 10 раз (от $x = 5$ мм до $x = 52$ мм от открытого торца трубы) приводит к

уменьшению скорости приблизительно в 25 раз (от $v = 2,7$ м/с до $v = 0,1$ м/с). Область струи практически не наблюдается на расстоянии, равном внутреннему диаметру трубы, в отличие от режима с образованием ударных волн, где эта область занимает до 5 размеров внутреннего диаметра трубы [11]. Это связано с расширением цилиндрической струи при удалении от открытого торца уже на расстоянии $x = 14$ мм.

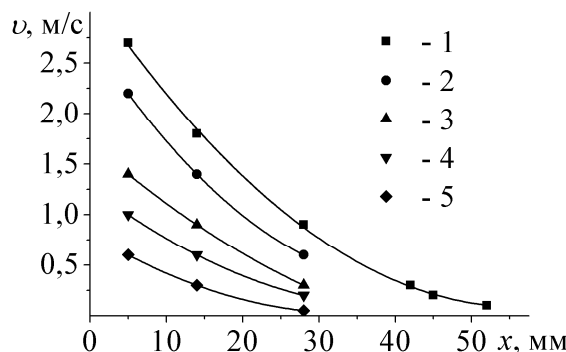


Рис. 4 – Зависимость скорости течения газа на оси трубы от расстояния от открытого торца на первой собственной частоте $\nu_{11} = 78,6$ Гц для различных значений амплитуды смещения поршня: 1 – $l = 1,75$ мм, 2 – $l = 1,25$ мм, 3 – $l = 0,75$ мм, 4 – $l = 0,5$ мм, 5 – $l = 0,25$ мм

Аналогичные зависимости для скорости течения газа наблюдаются также и в до-резонансных и после-резонансных режимах колебаний. При этом, когда в резонансе зависимости носят нелинейный характер, то вдали от резонанса наблюдаются практически линейные зависимости. Это связано с тем, что только в узкой области частот вблизи резонанса в открытой трубе существенную роль начинают играть нелинейные эффекты течения газа вблизи открытого торца трубы.

Заключение

Таким образом, изучено внешнее волновое поле открытой трубы в разных сечениях при различных амплитудах смещения поршня вблизи первой собственной частоты в безударно-волновом режиме. Показано, что ядро потока в безударно-волновом течении составляет менее 0,7 радиуса трубы, в отличие от режима с образованием ударных волн, при котором ядро потока составляет 1,5 до 6 радиусов трубы. Увеличение амплитуды смещения поршня приводит к росту скорости течения газа для всех расстояний от открытого торца трубы. Ближе к торцу трубы наблюдается нелинейный характер возрастания скорости. Дальнейшее увеличение расстояния приводит к тому, что возрастание скорости течения газа принимает линейную зависимость от амплитуды смещения поршня. Выявлено, что вблизи открытого торца трубы с увеличением амплитуды смещения поршня в 7 раз скорость течения газа на резонансе возрастает в 4,5 раза, а увеличение расстояния в 10 раз приводит к уменьшению скорости приблизительно в 25 раз.

Работа выполнена по программе ОЭММПУ РАН (№ 13 ОЭ), при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-01-00135) и в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг. (соглашение № 14.В37.21.0644).

Литература

1. В.Е. Накоряков, А.П. Бурдуков, А.М. Болдырев, П.Н. Терлеев, *Тепло- и массообмен в звуковом поле*. Наука. Сибирское отделение, Новосибирск, 1970. 253 с.
2. М.А. Pgamov, R.G. Zaripov, R.G. Galiullin, V.B. Repin, *Applied Mechanics Reviews*, **49**, 3, 137-154 (1996).
3. Р.Г. Зарипов, *Акустический журнал*, **23**, 3, 378-383 (1977).
4. В.Б. Репин, Ю.Н. Новиков, А.П. Дементьев, В сб. *Нестационарные задачи в механике*. Казань, 1989. С.103-110.
5. В.Б. Репин, Ю.Н. Новиков, А.П. Дементьев, *Инженерно-физический журнал*, **58**, 6, 1027-1028 (1990).
6. Р.Г. Галиуллин, Г.Г. Хакимов, *Инженерно-физический журнал*, **37**, 6, 1043-1050 (1979).
7. М. Salikuddin, W.H. Broun, *J. of Sound and Vibration*, **106**, 1, 71-106 (1985).
8. G.E. Hudson, *JASA*, **42**, 3, 406-416 (1955).
9. Л.С. Васильев, Р.Г. Зарипов, А.Т. Магсумова, О.Р. Сальянов, *Инженерно-физический журнал*, **61.**, 5, 714-716 (1991).
10. Р.Г. Зарипов, Р.И. Давыдов, Н.В. Сонин, *Изв. вузов. Авиационная техника*, 3, 1-3 (2001).
11. Р.Г. Галиуллин, И.П. Ревва, Г.Г. Халимов, *Акустический журнал*, **28**, 5, 617-621 (1982).
12. А.В. Репина, В.Б. Репин, Р.Г. Зарипов, *Вестник Казанского технологического университета*, 3, 161-164 (2011).
13. А.В. Репина, В.Б. Репин, Р.Г. Зарипов, Е.И. Мекешкина-Абдуллина, *Вестник Казанского технологического университета*, 11, 196-198 (2011).

© Л. А. Ткаченко – канд. физ.-мат. наук, доцент, с.н.с. ИММ КазНЦ РАН, доц. каф. техн. физики и энерг. КФУ, luda_tkachenko@inbox.ru; Р. Г. Зарипов – д-р физ.-мат. наук, профессор, зам дир. по науч работе ИММ КазНЦ РАН, проф. каф. техн. физики и энерг. КФУ, zaripov@mail.knc.ru.