

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 направлениях 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 IEPE 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 $u = 0,2$ м/с, что связано с рассеянием ядра. Дальнейшее увеличение расстояния приводит к тому, что значения скорости газа от максимальной его величины уменьшаются до $u = 0,1$ 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 $u = 0,1$ 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 $u = 0,6$ м/с при амплитуде $l = 0,25$ мм до $u = 2,7$ 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 $u = 2,7$ м/с до $u = 0,1$ 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.