

УДК: 534.26
OECD: 01.03.AA

Акустический импеданс круглых отверстий

Быков А.И.¹, Комкин А.И.^{2*}

¹ Ассистент, ² Профессор

^{1,2} МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, РФ

Аннотация

Приводятся результаты экспериментального исследования акустического импеданса круглого отверстия в стальной пластине толщиной 2 мм. Диаметр отверстий варьировался от 5 до 15 мм. Пластины устанавливались на конце импедансной трубы диаметром 99 мм. Действительная часть импеданса описывалась безразмерным сопротивлением, а мнимая - присоединенной длиной отверстия. Исследования показали, что для получения достоверных зависимостей импеданса отверстия от скорости среды в отверстии в области развитой нелинейности скорость в отверстии должна определяться по результатам измерений. Измерения скорости в отверстии осуществлялись с помощью трубки Пито. В этом случае зависимости действительной и мнимой частей импеданса от скорости в отверстии нелинейны, и диаметр отверстия не влияет на эти зависимости.

Ключевые слова: сопротивление, присоединенная длина, нелинейность, трубка Пито, измерение.

The acoustic impedance of the circular orifices

Bykov A.I.¹, Komkin A.I.^{2}*

¹ Assistant, ² Professor

^{1,2} Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Abstract

The results of an experimental study of an acoustic impedance of a circular orifice in a 2 mm thick steel plate are presented. The diameter of the orifices varied from 5 to 15 mm. The plates were installed at the end of an impedance tube with a diameter of 99 mm. The real part of the impedance is described by a dimensionless resistance, and the imaginary attached to the length of the orifice. The studies demonstrate that in order to obtain reliable dependences of the orifice impedance on the velocity of the medium in the orifice in the area of developed nonlinearity, the velocity in the orifice must be determined from the results of measurements. Velocity measurements in the orifice were made using a Pitot tube. In this case, the dependencies of the real and imaginary parts of the impedance on the velocity in the orifice are nonlinear, and the orifice diameter does not affect these dependencies

Keywords: *resistance, attached length, nonlinearity, Pitot tube, measurement.*

Введение

Знание акустических характеристик отверстия, в частности его акустического импеданса, имеет большое практическое значение. Отверстие относится к основным элементам в глушителях шума, оно может являться горлом различного рода резонаторов, а также является неотъемлемой частью перфорированных поверхностей. То насколько хорошо известны его акустические характеристики, особенно при высоких уровнях звукового давления, может быть определяющим фактором при разработке эффективных систем защиты от шума.

Исследованию акустического импеданса отверстия посвящено большое количество работ [1-21]. При этом следует сразу сказать об одной особенности, состоящей в том, что эти работы можно разделить на две группы. К первой относятся исследования характеристик отверстия в рамках линейной акустики, что соответствует невысоким уровням звукового давления. Большинство основополагающих результатов по линейному импедансу отверстия были получены уже давно. При этом необходимо прежде всего отметить труды лорда Рэля [1] и Крендалла [2], можно считать, что к настоящему времени этот вопрос изучен достаточно хорошо, хотя и здесь еще существуют некоторые вопросы, требующие своего разрешения. С интенсивным развитием методов конечно-элементного моделирования в последнее время многие из этих вопросов удалось прояснить. Вторая группа работ относится к исследованию импеданса отверстий на нелинейных режимах работы, соответствующих высоким уровням звукового давления. И хотя эти исследования проводятся уже в течении длительного времени здесь остается еще очень много нерешенных проблем.

Импеданс перегородки с отверстием Z , размещенной на срезе импедансной трубы, определяется отношением амплитуды звукового давления P к амплитуде колебательной скорости U у стенки перегородки в импедансной трубе: $Z = P/U$. В свою очередь, импеданс самого отверстия в перегородке $Z_0 = P/U_0$, где U_0 - амплитуда колебательной скорости в отверстии в перегородки. Очевидно имеет место следующее соотношение:

$$Z_0 = (U/U_0)Z. \quad (1)$$

В рамках линейной акустики в силу закона сохранения объемных скоростей при прохождении звуковой волной отверстия в перегородке соотношение (1) можно также записать в виде:

$$Z_0 = g^2 Z, \quad (2)$$

где g - безразмерный параметр, равный отношению диаметра отверстия к диаметру импедансной трубы, $g = d_0/d$.

В дальнейшем мы будем рассматривать безразмерный импеданс отверстия, определяемый соотношением $\bar{Z}_0 = Z_0/\rho c$, где ρ - плотность воздуха; c - скорость звука в воздухе. Следует иметь ввиду, что акустический импеданс отверстия, и в частности его безразмерный аналог, является комплексной величиной:

$$\bar{Z}_0 = \bar{R}_0 + i\bar{X}_0. \quad (3)$$

Действительная часть акустического импеданса в (3), так называемое безразмерное сопротивление отверстия, в рамках линейной акустики определяется вязкими потерями в отверстии и описывается выражением [3]:

$$\bar{R}_0 = 2k\delta_v(l/d_0 + N + E), \quad (4)$$

где $k = \omega/c$ – волновое число; ω – угловая частота; $\delta_v = (2\nu/\omega)^{1/2}$ – глубина вязкого погранслоя; ν – кинематическая вязкость воздуха, $\nu = 1,5 \cdot 10^{-5}$ м²/с; l – длина отверстия (толщина перегородки). При этом, первое слагаемое в скобках формулы (4) определяет вязкие потери на стенках отверстия, а величины N и E – вязкие потери на стенках перегородки и на кромках отверстия. Для рассматриваемой конфигурации перегородки, как показано в [3], можно положить $N = 0,3$ и $E = 0,85$.

В свою очередь, мнимую часть безразмерного импеданса принято описывать через присоединенную длину отверстия:

$$\bar{X}_0 = kl_e, \quad (5)$$

где l_e – эффективная длина горла, $l_e = l + l_{al}$; l и l_{al} – действительная длина отверстия и его присоединенная длина соответственно.

$$l_{al} = \alpha(1 - \beta g)d_0, \quad (6)$$

где α и β – постоянные коэффициенты, значения которых зависят от толщины перегородки. Значения этих коэффициентов на начальном этапе были определены аналитически для двух предельных случаев: бесконечно тонкой [4] и бесконечно толстой [5] перегородок. В последнее время, с появлением возможности конечно-элементного моделирования, было произведено их уточнение. Так в [6] было получено, что, например, для перегородки толщиной 1 мм коэффициент $\alpha = 0,81$, а при дальнейшем увеличении толщины его значение постепенно увеличивается до 0,82. Значение коэффициента β при толщине перегородки $l > 1$ мм равно 0,34.

Определение импеданса отверстия на нелинейном режиме представляет собой гораздо более сложную задачу. Многие связанные с этим вопросы остаются без ответа до настоящего времени, хотя первое исследование в этом направлении выполнено Сивианом еще в 30-е годы прошлого века. Он в частности установил [7], что при высоких уровнях звукового давления происходит интенсивный рост сопротивления отверстия и предположил, что сопротивление отверстия линейно растет с увеличением колебательной скорости в отверстии, как это имеет место в гидравлике в соответствии с законом Бернулли. Большой вклад в исследование нелинейного импеданса отверстия внес Ингард [7, 8, 12]. Им с соавторами показано, что основным фактором, определяющим импеданс отверстия на нелинейных режимах, является струйный характер движения воздуха, выходящего из отверстия. При этом Ингардом сопротивление трения была предложил следующую формулу:

$$R_0 = 2\rho\sqrt{2\nu\omega}(l/d_0 + \bar{\Delta}_v + \bar{\Delta}_{nl}), \quad (7)$$

где $\bar{\Delta}_v$ – безразмерная (отнесенная к d_0) линейная диссипативная присоединенная длина отверстия, описывающая вязкие потери в окрестности отверстия и на его кромках и согласно Ингарду равная 1; $\bar{\Delta}_{nl}$ – безразмерная (отнесенная к d_0) нелинейная диссипативная присоединенная длина отверстия, описывающая потери на нелинейном режиме работы.

Выражение (7) приводит к возможности представления безразмерного акустического сопротивления отверстия в виде $\bar{R}_0 = R_0/(\rho\sqrt{\nu\omega})$. Выбор нормировки величины $\sqrt{\nu\omega}$, а не обычно используемой с этой целью скорости звука c , был предложен Пэнтоном и Голдманом [14] и позволил им получить зависимости сопротивления отверстия от колебательной скорости в нем инвариантные относительно частоты звука.

Подход Пэнтон и Голдмана к нормировке сопротивления отверстия был использован позднее Дикеем с соавторами [16]. Полученная ими экспериментальная

зависимость безразмерного сопротивления отверстия от колебательной скорости была аппроксимирована степенной функцией с показателем степени $n = 1,72$. Примечательно, что значение этого показателя практически совпадает с тем, что получено ранее Ингардом в [8].

Следует отметить, что процесс перехода от линейного к нелинейному режиму имеет сложный характер. Между ними имеется некоторая переходная зона, и только за ней начинается режим развитой нелинейности, в которой и предположительно и начинает выполняться закон Бернулли. Такую особенность отмечал, в частности, Ингард [12]. Между тем, в большинстве опубликованных работ, за исключением [10], исследования ограничивались только переходным режимом.

Еще одна особенность известных работ по нелинейному импедансу отверстий заключается в том, что в них, как это ни удивительно, практически не исследовалась зависимость импеданса отверстия от его диаметра. В [20] определялось безразмерное нелинейное акустическое сопротивление отверстий в предположении, что на нелинейном режиме, выполняется справедливый для линейной акустики закон сохранения объемной скорости. Было получено, что нелинейное сопротивление, в противоположность линейному, увеличивается пропорционально диаметру отверстия. Однако, этот результат не имеет ясной физической интерпретации, так что проблема влияния размеров отверстия на его нелинейное сопротивление требует решения.

В [19] рассматривалось влияние высоких уровней звукового давления на изменение относительной присоединенной длины отверстия, определяемой соотношением:

$$\bar{l}_a = l_a/l_{al} = 1 - \Delta l_{an}, \quad (8)$$

где l_{al} - линейная присоединенная длина отверстия, определяемая согласно (6), $l_{al} = 0,81(1 - 1,34g)d_0$, а Δl_{an} - относительное уменьшение присоединенной длины, вызванное нелинейными процессами.

Установлено, что с ростом колебательной скорости в отверстии его присоединенная длина, сначала значительно уменьшается, а далее выходит на постоянный уровень, величина которого уменьшается с уменьшением диаметра отверстий. Такой результат далеко не очевиден и требует дополнительного исследования.

Настоящая статья посвящена изучению акустического импеданса круглых отверстий различных диаметров в первую очередь на нелинейных режимах. Основные задачи данной работы состоят в получении надежных результатов измерений акустического импеданса отверстий разного диаметра, оценка зависимости этой величины от колебательной скорости в отверстии при ее изменении в широком диапазоне амплитуд, а также проверка широко распространенного предположения о том, что на нелинейных режимах акустическое сопротивление отверстия определяется на основе закона Бернулли.

1. Экспериментальная установка

В данной работе исследовался акустический импеданс отверстий в импедансной трубе с внутренним диаметром 99 мм в широком диапазоне уровней звукового давления. Схема экспериментальной установки изображена на рис.1. С одной стороны импедансной трубы располагался исследуемый образец в виде стальной пластины толщиной 2 мм с центральным отверстием, диаметр которого при проведении измерений изменялся от 5 мм до 15 мм. С другой стороны, к трубе через конфузор подсоединялся динамик Веута 12М1100 диаметром 300 мм и мощностью 400 Вт. При этом динамик излучал sweer-сигнал в полосе 10 Гц с центральной частотой 150 Гц с длительностью развертки – 1 с. Этот сигнал поступал на динамик с компьютера через усилитель мощностью 600 Вт.

Все это давало возможность создавать в импедансной трубе звуковое давление с уровнем до 165 дБ. Это звуковое давление регистрировалось двумя четвертьдюймовыми микрофонами РСВ 378С10. Сигналы микрофонов подавались на предварительный усилитель РСВ 482С, а затем поступали на анализатор сигналов V&K PHOTON +, который вычислял спектральные характеристики измеренных звуковых давлений. Далее полученные характеристики обрабатывались на компьютере и там методом передаточных функций определялись амплитуды прямой и отраженной волн в импедансной трубе. Затем, используя эти значения амплитуд, осуществлялся расчет амплитуд звукового давления и колебательной скорости у внутренней стороны пластины, коэффициент отражения пластины и ее акустический импеданс. Далее акустический импеданс пластины пересчитывался в импеданс отверстия.

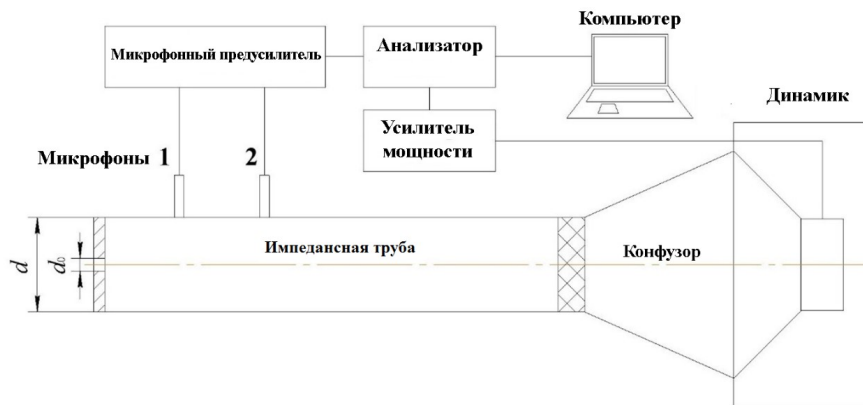


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

2. Результаты

На первом этапе исследований акустический импеданс отверстия определялся с помощью формулы (2), в предположении, что на нелинейном режиме при прохождении звуковой волной отверстия в пластине выполняется, как и линейном режиме, закон сохранения объемной скорости. Однако использование такого подхода привело к физически противоречивому результату, когда сопротивление отверстия, вопреки ожиданию, увеличивалось с увеличением его диаметра.

Что касается мнимой части импеданса отверстия, то она оценивалась в терминах относительной присоединённой длины отверстия по формуле (8). Оказалось, что с увеличением звукового давления, а, следовательно, и колебательной скорости в отверстии, относительная присоединенная длина отверстия начинает снижаться, причем уже упоминалось ранее, чем меньше диаметр отверстия, тем больше величина этого снижения. Такой результат также не имеет ясной физической интерпретации.

С учетом этих обстоятельств было решено провести прямые измерения скорости в отверстии на нелинейных режимах с помощью трубки Пито. Ее чувствительности оказалась достаточной для получения достоверных результатов при уровнях звукового давления L_p у отверстия более 125 дБ, когда значения колебательной скорости в отверстии превышали 3 м/с. Полученные при этом результаты для пяти диаметров отверстий, представленные на рис. 2, показали, что измеренная скорость в отверстии V_0 практически не зависит от диаметра отверстий. Полученный при этом некоторый разброс значений следует рассматривать как результат погрешности измерений, так как он, по сути, не изменяется с ростом уровня звукового давления в трубе. Сразу стоит отметить, что такой результат напрямую противоречит закону сохранения объемных скоростей.

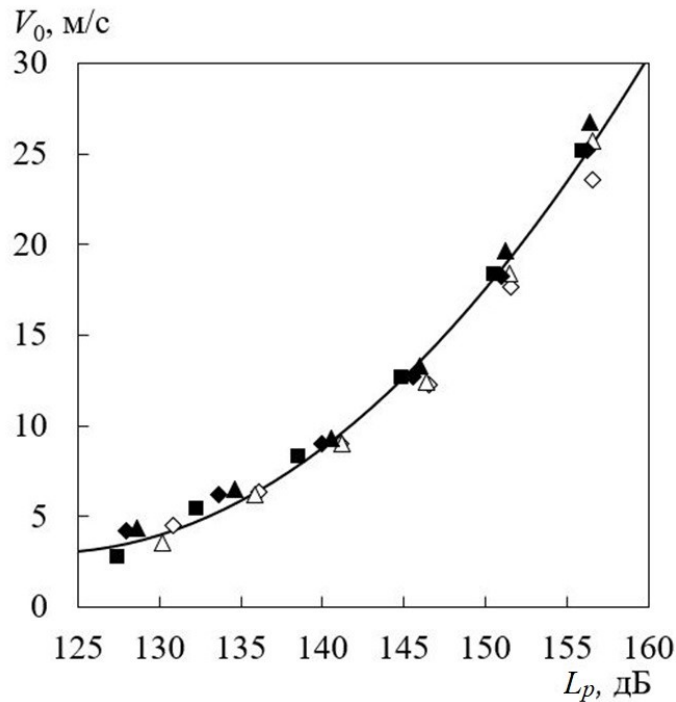


Рис. 2. Измеренная скорость в отверстии пластины как функция звукового давления у пластины: (◇) - 5 мм; (△) - 7 мм; (▲) - 10 мм; (◆) - 12 мм; (■) - 15 мм; — аппроксимация

Полученные данные измерений были аппроксимированы аналитической функцией вида:

$$V_0(L_p) = 0,02(L_p - 123)^2 + 3. \quad (9)$$

На рис. 2 сплошной линией представлена вычисленная по формуле (9) аппроксимирующая кривая, которая показывает хорошее соответствие экспериментальным данным и доказывает, что единственным фактором, определяющим скорость в отверстии V_0 , является звуковое давление у перегородки L_p .

2.1. Действительная часть импеданса отверстия

Аппроксимация (9) была использована далее для построения зависимости импеданса отверстий различных диаметров от измеренной колебательной скорости в отверстии. Формула (1) для импеданса отверстия в этом случае преобразовывалась к виду:

$$\bar{Z}_0 = (U/V_0)\bar{Z}. \quad (10)$$

Вычисленные в соответствии с (10) зависимости безразмерного сопротивления от скорости V_0 показали, что на режимах развитой нелинейности, когда значения звукового давления $L_p > 145$ дБ, сопротивление отверстия практически перестает зависеть от его диаметра и связано с величинами L_p и V_0 нелинейными зависимостями. При меньших значениях L_p и V_0 , зависимости, соответствующие разным диаметрам, спадая, начинают расходиться. При этом больший диаметр отверстия определяет и более крутой спад соответствующей кривой.

Если рассматривать зависимость \bar{R}_0 от V_0 в целом, с точки зрения ее

аналитического описания, то целесообразно выделить три характерных области: линейный, переходный и развитой нелинейности.

В линейной области, при $V_0 < 0,7$ м/с, сопротивление отверстия уменьшается с увеличением диаметра, не зависит от колебательной скорости в отверстии и описывается в соответствии с (4) следующим образом:

$$\bar{R}_{01} = 9,8 \cdot 10^{-4}(l/d_0 + 1,15). \quad (11)$$

В переходной области, при $0,7 \text{ м/с} \leq V_0 \leq 10 \text{ м/с}$, наблюдается сложная зависимость сопротивления отверстия \bar{R}_0 от V_0 , которая может быть аппроксимирована выражением:

$$\bar{R}_{02} = a^3(V_0 - 0,6)^3 \left(1 - \frac{0,995b^3(V_0 - 0,6)^3}{1 + b^3(V_0 - 0,6)^3} \right) + \bar{R}_{01}, \quad (12)$$

где $a = -0,01(d_0/l) + 0,144$; $b = 0,03(d_0/l) + 0,39$.

В области развитой нелинейности, $V_0 > 10$ м/с, акустическое сопротивление отверстия перестает зависеть от его диаметра. Важно отметить, что данная зависимость имеет выраженную квадратичную зависимость от колебательной скорости в нем:

$$\bar{R}_{03} = 1,2 \cdot 10^{-4}V_0^2 + 0,048. \quad (13)$$

Аппроксимирующие графические зависимости, определенные формулами (11) – (13) для диаметров отверстий 5, 10 и 15 мм представлены на рис. 3 соответственно точечной, штриховой и сплошной линиями. Следует отметить их хорошее совпадение с соответствующими сопротивлением отверстий, которые получены в результате экспериментальных измерений и отмечены точками.

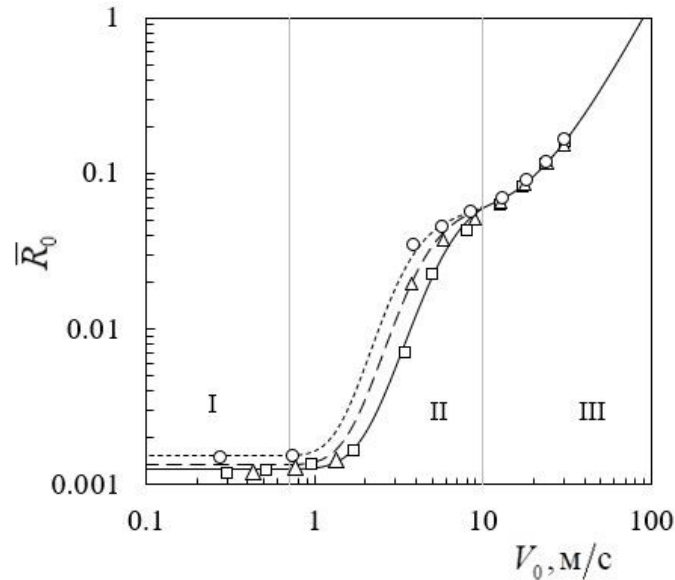


Рис. 3. \bar{R}_0 как функция V_0 в линейной области (I), переходной области (II) и области развитой нелинейности (III) для отверстий диаметром: (.....○.....) - 5 мм; (- - △ - -) - 10 мм; (- □ -) - 15 мм

2.2. Мнимая часть импеданса отверстия

Затем в работе были исследованы зависимости мнимой части импеданса отверстия от измеренной скорости V_0 . В области развитой нелинейности с увеличением скорости V_0

значения мнимой части импеданса отверстия сначала медленно уменьшаются, а затем начинают возрастать. Следует отметить, что при таких изменениях значения мнимой части импеданса отверстия все-таки остаются меньше значения импеданса при $V_0 \rightarrow 0$, соответствующего линейной области и определяемого по формуле (5). Это позволяет нам формально описать изменение мнимой части импеданса отверстия в области развитой нелинейности в терминах присоединенной длины, как это обычно делается в линейной акустике. Следует подчеркнуть, что это формальный подход и он не применим для использования в переходной области. Используя приведенные выше формулы, мнимая часть импеданса была преобразована в безразмерную нелинейную присоединенную длину отверстия, а затем были построены зависимости этой величины от скорости V_0 , представленные на рис. 4.

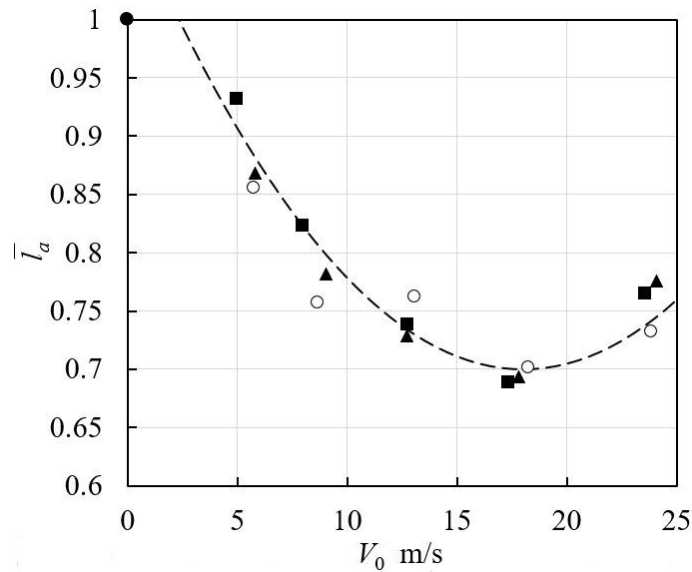


Рис. 4. \bar{l}_a как функция V_0 для отверстий диаметром:
 (—○—) - 5 мм; (—▲—) - 10 мм; (—■—) - 15 мм

Эти результаты показывают, что нелинейная присоединенная длина отверстия \bar{l}_a слабо зависит от его диаметра d_0 . В свою очередь зависимость \bar{l}_a от скорости V_0 может быть аппроксимирована параболической функцией:

$$\bar{l}_a = 1,22 \cdot 10^{-3}(V_0 - 18)^2 + 0,3. \quad (14)$$

Такая аппроксимация применима только для $V_0 > 5$ м/с. График этой аппроксимации представлен на рис. 4 штриховой линией.

3. Обсуждение

Важным замечанием к работе является то, что полученные результаты все-таки носят ограниченную применимость. В первую очередь результаты применимы только к большим отверстиям, когда толщина пограничного слоя для стенок таких отверстий намного меньше диаметра этих отверстий. Помимо этого, в работе исследовались только пластины толщиной 2 мм, поэтому строго говоря, представленные результаты будут справедливыми только для отверстий с такой толщиной пластин. В тоже время, по-видимому, общие закономерности влияния диаметра отверстия на его акустический импеданс будут иметь такой же характер и при рассмотрении образцов другой толщины.

Еще один вопрос, требующий разрешения, является правомерность применения закона Бернулли при рассмотрении прохождения звуковой волной отверстия на режиме

развитой нелинейности. Закон Бернулли справедлив для постоянных потоков среды через отверстие и связывает давление у отверстия p со скоростью истечения среды из отверстия V_0 квадратичной зависимостью, в которую также не входит диаметр отверстия. Кроме того эта зависимость показывает, что сопротивление отверстия со скоростью среды в нем связаны линейно. Однако этот закон вступает в противоречие с законом сохранения объемных скоростей, который справедлив для линейной акустики и согласно которому колебательная скорость в отверстии будет определяться отношением площадей поперечных сечений импедансной трубы и отверстия. Весомым аргументом в пользу достоверности полученных результатов является то, экспериментально полученные точки на зависимости сопротивления отверстия от скорости в нем для разных диаметров отверстий ложатся на одну кривую.

Поведение мнимой части импеданса отверстия конечно также требует дополнительных исследований и объяснений. Однако нельзя не отметить, что в отличие от предшествующих работ, где присоединная длина отверстия определялась исходя из закона сохранения объемной скорости и наблюдалось существенное снижение присоединенной длины отверстия с увеличением расчетной скорости в нем, причем меньшему диаметру отверстия соответствовало большее снижение присоединенной длины, настоящая работа показала, что снижение присоединенной длины отверстия практически не зависит от диаметра отверстий и не превышает 35 %.

Заключение

Проведенные в импедансной трубе исследования зависимостей акустического импеданса отверстия от скорости частиц в нем для различных диаметров отверстий показали, что в них можно выделить три характерные области: линейную, переходную и развитой нелинейности.

Установлено, что справедливый для линейной акустики закон сохранения объемной скорости при прохождении звуковой волны через отверстие в области развитой нелинейности не выполняется. Проведенные в этой области измерения колебательной скорости в отверстии с использованием трубки Пито показали, что эта скорость определяется только звуковым давлением у отверстия и не зависит от его диаметра.

Определение импеданса отверстия с использованием измеренных значений скорости в нем, приводит к кардинальным изменениям в получаемых результатах на режиме развитой нелинейности. Так, сопротивление отверстия уже не зависит от его диаметра, но в отличие от того, что дает классический закон Бернулли, зависимость сопротивления от скорости является не линейной, а квадратичной. Кроме того, формально выражая мнимую часть полного импеданса отверстия через его присоединенную длину, получаем, что такая присоединенная длина также практически не зависит от диаметра отверстия. При этом зависимость присоединяемой длины отверстия от скорости в нем является нелинейной.

Список литературы

1. Стретт Дж. В. (Лорд Рэлей). Теория звука: в 2-х т.: Пер с англ. – М.: ГИТТЛ, 1955. – Т.2.– 476 с.
2. Крендалл И.Б. Акустика: Пер. с англ.-М.: Комкнига, 2007.- 168 с.
3. Комкин А. И., Миронов М. А., Быков А. И. Поглощение звука резонатором Гельмгольца //Акуст. журн. – 2017. – Т. 63. – №. 4. – С. 356-363.

4. Фок В.А. Теоретическое исследование проводимости круглого отверстия в перегородке, поставленной поперек трубы // Доклады АН СССР. - 1941. - V.31, № 9. - С. 875-878.
5. Karal F.C. The analogous acoustical impedance for discontinuities and constrictions of circular cross section // J. Acoust. Soc. Am. - 1953. - Vol. 25, № 2. - P. 327-334.
6. Комкин А. И., Миронов М. А., Юдин С. И. О присоединенной длине отверстий // Акуст. журн. - 2012. - Т. 58. - №. 6. - С. 677-677.
7. Sivian L.J. Acoustic impedance of small orifices // J. Acoust. Soc. Am. - 1935. - Vol. 7, № 3. - P. 94-101.
8. Ingard U., Labate S. Acoustic circulation effects and the non-linear impedance of orifices // J. Acoust. Soc. Am. - 1950. - Vol. 22, № 2. - P. 211-218.
9. Ingard U. On the theory and design of acoustic resonators // J. Acoust. Soc. Am. - 1950. - Vol. 25, № 6. - P. 1037-1061.
10. Bies D. A., Wilson O. B. Acoustic impedance of a Helmholtz resonator at very high amplitude // J. Acoust. Soc. Am. - 1957. - Vol. 29, № 6. - P. 711-714.
11. Thurston G. B., Hargrove L. E., Cook B.D. Nonlinear properties of circular orifices // J. Acoust. Soc. Am. - 1957. - Vol. 29, № 9. - P. 992-1017.
12. Ingard U., Ising H. Acoustic nonlinearity of an orifice // J. Acoust. Soc. Am. - 1967. - Vol. 42, № 1. - P. 6-17.
13. Zinn B. T. A theoretical study of non-linear damping by Helmholtz resonators // J. Sound and Vibr. - 1970. - Vol. 13, № 3. - P. 347-356.
14. Panton R. L., Goldman A. L. Correlation of nonlinear orifice impedance orifice // J. Acoust. Soc. Am. - 1976. - Vol. 60, № 6. - P. 1390-1396.
15. Велижанина К.А., Лебедева И.В. Исследование резонансных звукопоглотителей при высоких уровнях звука // Акуст. журн. - 1980. - Т. 26. - №. 5. - С. 667-672.
16. Dickey N. S., Selamet A., Novak J. M. The effect of high-amplitude sound on the attenuation of perforated tube silencer // J. Acoust. Soc. Am. - 2000. - Vol. 108, № 5. - P. 1068-1081.
17. Jing X., Sun X. Sound-excited flow and acoustic nonlinearity at an orifice // Phys. Fluids - 2002. - Vol. 14, № 1. - P. 268-276.
18. Temiz M. A., Tournadre J., Arteaga I. L., Hirschberg A. Non-linear acoustic transfer impedance of micro-perforated plates with circular orifices // J. Sound and Vibr - 2016. - Vol. 366, № 2. - P. 418-428.
19. Комкин А. И., Быков А. И., Миронов М. А. Инерционная присоединенная длина отверстия при высоких уровнях звукового давления // Акуст. журн. - 2018. - Т. 64. - №. 3. - С. 296-301.
20. Комкин А. И., Быков А. И., Миронов М. А. Акустическое сопротивление отверстия при высоких уровнях звукового давления // Акуст. журн. - 2018. - Т. 64. - №. 5. - С. 562-565.
21. Bykov A., Komkin A., Moskalenko V. Measurements of acoustic flow parameters in the orifice on non-linear regime // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - IOP Publishing, 2019. - Т. 589. - №. 1. - С. 012015.

References

1. Strutt J. W. (Baron Rayleigh). The Theory of Sound. - McMillan, Michigan, 1896. - Vol.2.
2. Crandall I. B. Theory of Vibrating Systems and Sound. - D. Van Nostrand Company, Inc, 1926.

3. Komkin A. I., Mironov M. A., Bykov A. I. Sound absorption by a Helmholtz resonator // *Acoust. Phys.* - 2017. - Vol. 63, № 4. - P. 385-392.
4. Fok V. A. Teoreticheskoe issledovanie provodimosti kruglogo otverstiya v peregorodke, postavlennoj poperek trubyy // *Doklady AN SSSR* - 1941. - V.31, № 9. - P. 875-878.
5. Karal F.C. The analogous acoustical impedance for discontinuities and constrictions of circular cross section // *J. Acoust. Soc. Am.* - 1953. - Vol. 25, № 2. - P. 327-334.
6. Komkin A.I., Mironov M.A., Yudin S.I. On the attached length of orifices // *Acoust. Phys.* - 2012. - Vol. 58, № 6. - P. 628-632.
7. Sivian L.J. Acoustic impedance of small orifices // *J. Acoust. Soc. Am.* - 1935. - Vol. 7, № 3. - P. 94-101.
8. Ingard U., Labate S. Acoustic circulation effects and the non-linear impedance of orifices // *J. Acoust. Soc. Am.* - 1950. - Vol. 22, № 2. - P. 211-218.
9. Ingard U. On the theory and design of acoustic resonators // *J. Acoust. Soc. Am.* - 1950. - Vol. 25, № 6. - P. 1037-1061.
10. Bies D. A., Wilson O. B. Acoustic impedance of a Helmholtz resonator at very high amplitude // *J. Acoust. Soc. Am.* - 1957. - Vol. 29, № 6. - P. 711-714.
11. Thurston G. B., Hargrove L. E., Cook B.D. Nonlinear properties of circular orifices // *J. Acoust. Soc. Am.* - 1957. - Vol. 29, № 9. - P. 992-1017.
12. Ingard U., Ising H. Acoustic nonlinearity of an orifice // *J. Acoust. Soc. Am.* - 1967. - Vol. 42, № 1. - P. 6-17.
13. Zinn B. T. A theoretical study of non-linear damping by Helmholtz resonators // *J. Sound and Vibr.* - 1970. - Vol. 13, № 3. - P. 347-356.
14. Panton R. L., Goldman A. L. Correlation of nonlinear orifice impedance orifice // *J. Acoust. Soc. Am.* - 1976. - Vol. 60, № 6. - P. 1390-1396.
15. Velizhanina K. A., Lebedeva I. V. Study of resonant sound absorbers at high sonic level // *Sov. phys. Acoust.* - 1980. - Vol. 26, № 5. - P. 667-672.
16. Dickey N. S., Selamet A., Novak J. M. The effect of high-amplitude sound on the attenuation of perforated tube silencer // *J. Acoust. Soc. Am.* - 2000. - Vol. 108, № 5. - P. 1068-1081.
17. Jing X., Sun X. Sound-excited flow and acoustic nonlinearity at an orifice // *Phys. Fluids* - 2002. - Vol. 14, № 1. - P. 268-276.
18. Temiz M. A., Tournadre J., Arteaga I. L., Hirschberg A. Non-linear acoustic transfer impedance of micro-perforated plates with circular orifices // *J. Sound and Vibr* - 2016. - Vol. 366, № 2. - P. 418-428.
19. Komkin A. I., Bykov A. I., Mironov M. A. Inertial Attached Length of an Orifice at High Sound Pressure Levels // *Acoust. Phys.* - 2018. - T. 64. - №. 3. - P. 287-292.
20. Komkin A. I., Bykov A. I., Mironov M. A. Acoustic Resistance of an Orifice at High Sound Pressure Levels // *Acoust. Phys.* - 2018. - T. 64. - №. 5. - P. 563-566.
21. Bykov A., Komkin A., Moskalenko V. Measurements of acoustic flow parameters in the orifice on non-linear regime // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* - IOP Publishing, 2019. - Vol. 589. - №. 1. - C. 012015.