

Исследование акустического импеданса отверстия при высоких уровнях звука

А. И. Быков¹, А. И. Комкин^{1,*}, М. А. Миронов^{2†}

¹Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, факультет энергомашиностроения
Россия, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5

²Акустический институт имени академика Н.Н. Андреева. Россия, 117036, Москва, ул. Шверника, д. 4
(Статья поступила 14.07.2017; Подписана в печать 18.09.2017)

Исследовано влияние амплитуды звукового давления на акустический импеданс поперечной перегородки с отверстием в канале. Получены зависимости мнимой и действительной частей импеданса для различных отношений диаметра отверстия к диаметру канала на нелинейных режимах.

PACS: 43.50.Gi

УДК: 534.26

Ключевые слова: перегородка, отверстие, поглощение звука, нелинейность, измерение.

ВВЕДЕНИЕ

Статья отражает продолжение исследований поглощения резонатора Гельмгольца на торцевой стенке канала [1] для случая высоких уровней звукового давления в канале, когда характеристики резонатора становятся существенно нелинейными. Нелинейность резонатора, вызванная отрывом потока (образование струи) при вытекании из горла резонатора, рассматривалась в большом количестве работ (см., например, [2–9]). Более полно исследовано влияние отрыва на вещественную часть импеданса отверстия. Показано, что она увеличивается пропорционально амплитуде колебательной скорости в отверстии. Влияние на мнимую часть импеданса обнаружена экспериментально в работах [3, 5, 7] — мнимая часть импеданса при увеличении амплитуды колебательной скорости уменьшается, что соответствует уменьшению присоединенной длины отверстия. В других работах этого влияния не обнаруживалось, а ни в одной теоретической работе не учитывалось.

Целью настоящей работы является получение надежных экспериментальных данных относительно влияния амплитуды колебательной скорости в отверстии, как на вещественную, так и на мнимую компоненты импеданса отверстия. На основе этих данных можно построить математическую модель нелинейных колебаний резонатора Гельмгольца.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В экспериментах использовалась импедансная труба с внутренним диаметром $d = 99$ мм с двумя микрофонами 1, 2, отстоящими от торцевого сечения, в котором устанавливалась перегородка с отверстием, на расстоянии 281 мм и 153 мм соответственно (рис. 1).

В качестве источника звука использовался динамик SVEN HT-500 мощностью 120 Вт. Стандартным двух-

микрофонным методом измерялся импеданс перегородки на нескольких частотах при постепенно возрастающих уровнях звукового давления. Для возбуждения динамика использовался узкополосный ЛЧМ-сигнал с шириной полосы 10 Гц относительно заданной частоты. Уровни звукового давления менялись в диапазоне 85–135 дБ. Звуковое давление в канале измерялось парой 1/4-дюймовых конденсаторных микрофонов PSB 482C05. Затем сигналы с микрофонов подвергались спектральному анализу с помощью анализатора V&K PHOTON+, по результатам которого определялся коэффициент отражения звуковой волны от перегородки R , а потом и входной импеданс перегородки $z = \rho_c(1 + R)/(1 - R)$, где ρ_c — волновое сопротивление воздуха.

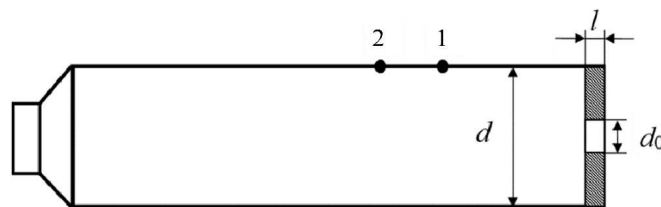


Рис. 1: Схема измерительной установки

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В качестве примера полученных первичных результатов на рис. 2 приведены зависимости нормированного входного импеданса перегородки $Z = z/(\rho_c)$ от уровней звукового давления на микрофоне 1 для двух отверстий с диаметрами $d_0 = 4$ мм и 7 мм на частотах 150 Гц и 200 Гц. Толщина перегородки составляла 2 мм. Как следует из представленных данных, при увеличении уровня звукового давления вещественная часть импеданса монотонно растет. Мнимая часть при малых уровнях звукового давления постоянна, затем уменьшается и выходит на новое постоянное значение («насыщение»), которое не зависит от частоты, но заметно возрастает с увеличением диаметра отверстия. Следует отметить, что в работах [3–8], где наблюда-

*E-mail: akomkin@mail.ru

†E-mail: miroнов@akin.ru

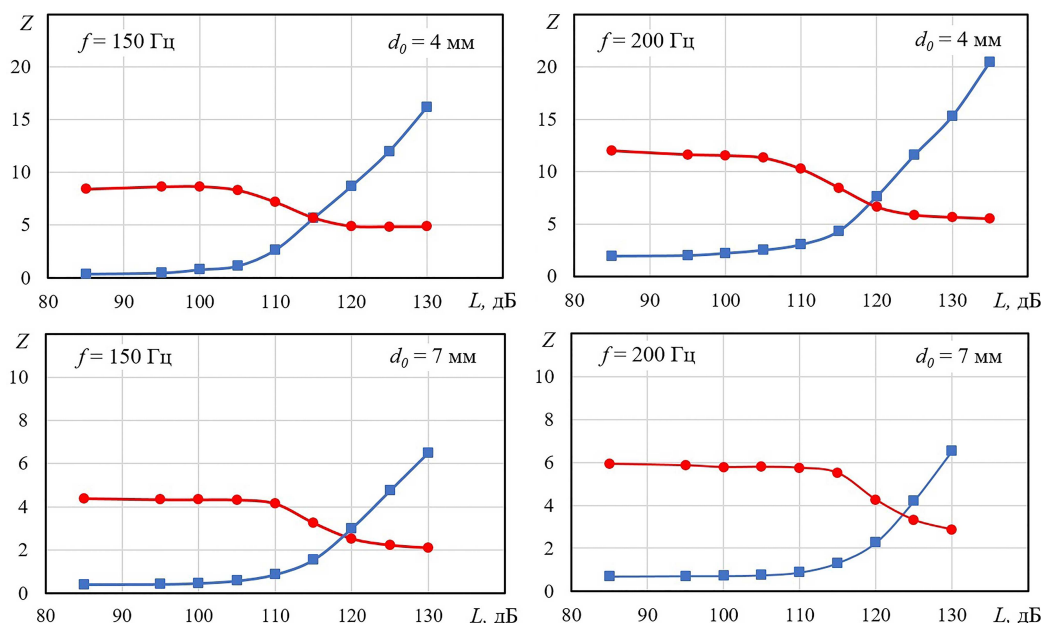


Рис. 2: Зависимость действительной (синий) и мнимой (красный) частей нормированного входного импеданса перегородки от уровня звукового давления в канале

лось уменьшение мнимой части импеданса отверстия при увеличении звукового давления, такого «насыщения» не отмечалось, или отмечалось, но не в таком явном виде.

Далее целесообразно перейти от входного импеданса перегородки с отверстием Z к импедансу самого отверстия Z_0 , используя соотношение $Z_0 = Z/m$, где $m = d^2/d_0^2$ — отношение площадей поперечных сечений трубы и отверстия. В линейной акустике безразмерный импеданс отверстия определяется выражением

$$Z_0 = R_s + ikl_e, \quad (1)$$

где R_s — нормированное сопротивление трения в отверстии, причем для линейного режима $R_s = 2k\delta_\nu l/d_0$; $k = \omega/c$ — волновое число; ω — угловая частота; $\delta_\nu = (2\nu/\omega)^{1/2}$ — глубина погранслоя; ν — кинематическая вязкость воздуха, $\nu = 1.5 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$; l_e — эффективная длина отверстия, $l_e = l + l_a$; l_a — присоединенная длина отверстия.

Графические зависимости безразмерного импеданса отверстия представлены на рис. 3. Для построения этих зависимостей уровень звукового давления L на микрофоне 1 пересчитывался в колебательную скорость в отверстии U . При этом зависимость между звуковым давлением $P = 0.00002 \cdot 10^{0.05L}$ и скоростью U определяется формулой

$$U = \frac{P}{\rho c} \frac{|\exp(iks) - H_{21}|}{2|\sin ks|} |1 - R|, \quad (2)$$

где s — расстояние между микрофонами; H_{21} — частотная переходная характеристика между сигналами с микрофонов.

На горизонтальной оси графиков на рис. 2, следуя [8], откладывается не скорость U , а безразмерная величина $U/\sqrt{\nu\omega}$. На вертикальной оси графиков откладываются безразмерная величина $Z_{0n} = Z_0/(kd_0)$.

Из представленных графиков следует, что использование нормировки позволило перейти к более универсальным акустическим характеристикам отверстия, существенно ослабив влияние на вид этих характеристик частоты.

Заметим, что мнимая часть откладываемой на графиках рис. 3 величины Z_{0n} согласно (1) равна $(l + l_a)/d_0$. Если из этой величины вычесть первое слагаемое, определяемое действительной длиной отверстия, то оставшаяся величина будет связана только с ее присоединенной длиной. Графики с соответствующими перестроениями представлены на рис. 4. Для небольших по сравнению с диаметром трубы отверстий в рамках линейной акустики присоединенная длина отверстия $l_a \approx 0.82d_0$. Это согласуется с результатами, представленными на рис. 4, где при малых колебательных скоростях в отверстии значение величины l_a/d_0 составляет порядка 0.8.

С увеличением колебательной скорости присоединенная длина отверстия начинает уменьшаться и затем выходит на новый постоянный уровень. Этот уровень, в отличие от первого, зависит от частоты. Однако такой результат обусловлен используемой при построении графиков нормировкой, которая подобрана для линейного режима работы. В действительности при нелинейном режиме работы, как показывают графики на рис. 2, мнимая часть импеданса не зависит от частоты, а определяется только диаметром отверстия, а фактически колебательной скоростью в отверстии. Но в лю-

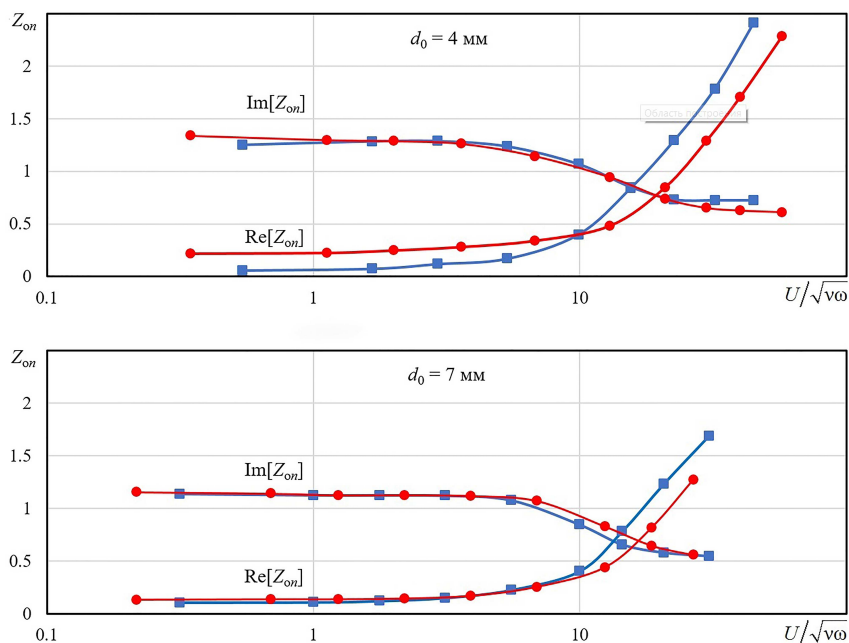


Рис. 3: Зависимость безразмерного импеданса отверстия от безразмерной колебательной скорости для частот 150 Гц (синий) и 200 Гц (красный)

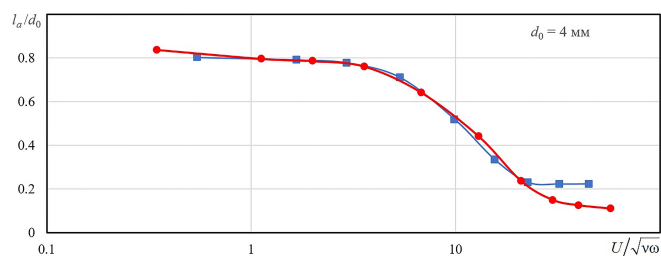


Рис. 4: Зависимость присоединенной длины отверстия от безразмерной колебательной скорости для частот 150 Гц (синий) и 200 Гц (красный)

бом случае оказывается, что присоединенная длина отверстия при выходе на нелинейный режим уменьшается не 2 два раза, как обычно принято считать, а в 4 и более раз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные измерения зависимости импеданса отверстия от уровня звукового давления в импедансной трубе показали, что вещественная часть импеданса монотонно увеличивается при увеличении звукового давления. Мнимая часть при малых уровнях звукового давления остается постоянной, а затем начинается его снижение и выход на новый постоянный уровень, который оказался значительно ниже того, что обычно предполагался, исходя из умозрительных соображений. Полученные результаты по определению акустического импеданса отверстия в перегородке в дальнейшем будут использованы при разработке нелинейной математической модели резонатора Гельмгольца, соответствующей высоким уровням звукового давления.

- [1] Комкин А. И., Миронов М. А., Быков А. И. Акуст. журн. 2017. **63**, № 4, С. 356.
- [2] Sivian L. J. J. Acoust. Soc. Am. 1935. **7**, № 3. P. 94.
- [3] Ingard U., Labate S. J. Acoust. Soc. Am. 1950. **22**, № 2. P. 211.
- [4] Ingard U. J. Acoust. Soc. Am. 1953. **25**, № 6. P. 1037.
- [5] Ingard U., Ising H. J. Acoust. Soc. Am. 1967. **42**, № 1. P. 6.
- [6] Велижанина К. А., Лебедева И. В. Акуст. журн. 1980.

- 26**, № 5. С. 667.
- [7] Wu J., Rudnick I. J. Acoust. Soc. Am. 1986. **80**, № 5. P. 1419.
- [8] Dickey N. S., Selamet A., Novak J. M. J. Acoust. Soc. Am. 2000. **108**, № 5. P. 1068.
- [9] Горенберг А. Я., Люкманов Э. И., Миронов М. А. и др. Сб. трудов XI сессии РАО. Москва. 2001. **1**. С. 101.

The study of the acoustic impedance of a hole at high sound level

A. I. Bykov¹, A. I. Komkin^{1,a}, M. A. Mironov^{2,b}

¹*Faculty of Power Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow 105005, Russia*

²*Andreyev Acoustic Institute, Москва 117036, Russia*

E-mail: ^aakomkin@mail.ru, ^bmironov@akin.ru

The effect of the sound pressure amplitude in the channel on the acoustic impedance of the transverse septum with an aperture is studied. The dependences of the imaginary and real parts of the impedance for different ratios of the hole diameter to the channel diameter in nonlinear modes are obtained.

PACS: 43.50.Gf

Keywords: partition, hole, sound absorption, nonlinearity, measurement.

Received 14 July 2017.

Сведения об авторах

1. Быков Алексей Иванович — аспирант.
 2. Комкин Александр Иванович — доктор техн. наук, доцент, профессор; тел.: (499) 263-68-93, e-mail: akomkin@mail.ru.
 3. Миронов Михаил Арсеньевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, зав. отделом.
-