

## АКУСТИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ОТВЕРСТИЯ ПРИ ВЫСОКИХ УРОВНЯХ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ

© 2018 г. А. И. Комкин<sup>а, \*</sup>, А. И. Быков<sup>а</sup>, М. А. Миронов<sup>а, б, \*\*</sup>

<sup>а</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
105005 Москва, ул. 2-я Бауманская 5, Россия

<sup>б</sup>Акустический институт им. акад. Н.Н. Андреева РАН  
117036 Москва, ул. Шверника 4, Россия

\*e-mail: akomkin@mail.ru

\*\*e-mail: mironov@akin.ru

Поступила в редакцию 24.10.2017 г.

Исследовано влияние уровней звукового давления на акустическое сопротивление отверстия в перегородке на основе проведения измерений в импедансной трубе методом двух микрофонов. Получены зависимости сопротивления отверстия от его диаметра на нелинейных режимах. Показано, что на нелинейном режиме сопротивление отверстия зависит от его диаметра. Проведена аппроксимация зависимости нелинейного сопротивления от колебательной скорости в отверстии линейной функцией.

**Ключевые слова:** перегородка, отверстие, акустический импеданс, вязкое сопротивление, нелинейное сопротивление, измерение

**DOI:** 10.1134/S0320791918040081

Хорошо известно [1–8], что при высоких уровнях звукового давления, на нелинейных режимах, акустический импеданс отверстия существенно меняется. Это в первую очередь относится к вещественной части импеданса отверстия, определяемой как сопротивление трения  $R$ . Сопротивление трения  $R$ , связанное с диссипативными потерями в отверстии, интенсивно возрастает начиная с некоторой пороговой амплитуды колебательной скорости в отверстии. Это явление было исследовано еще Сивианом [2], который также предложил для его описания эмпирическую формулу

$$R = R_0 + \rho U / (2A), \quad (1)$$

где  $R_0$  – линейное сопротивление, соответствующее низким значениям объемной колебательной скорости  $U$ ;  $\rho$  – плотность среды;  $A$  – площадь поперечного сечения отверстия.

Следует отметить, что правомерность использования этой формулы недостаточно убедительно подкреплена экспериментальными данными, а кроме того, величина в знаменателе второго слагаемого должна быть безразмерной величиной, чтобы размерности всех слагаемых в предложенной формуле совпадали. В последующем на формулу (1) дается ссылка в [3], но ее применение также не обосновано, так как экспериментальные данные там приведены только для одного диаметра отверстия. Этот вопрос рассматривался

и в классических работах Ингарда [1, 4], где для описания сопротивления трения предложена формула

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

где  $\nu$  – кинематическая вязкость воздуха,  $\nu = 1.5 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\omega$  – угловая частота;  $l$  – толщина отверстия;  $d_0$  – диаметр отверстия;  $\bar{\Delta}_v$  – нормированная относительно  $d_0$  диссипативная присоединенная длина отверстия, определяющая вязкие потери в окрестности отверстия и на его кромках и принятая равной 1;  $\Delta_{nl}$  – нелинейная присоединенная длина отверстия, определяющая потери при высоких уровнях колебательной скорости в отверстии.

Заметим, что в соответствии с (2) нелинейные потери, как и вязкие потери в отверстии, полагаются обратно пропорциональными диаметру отверстия. Однако представленные в [1] экспериментальные данные не позволяют дать однозначного ответа, что это действительно так. Кроме того, если нелинейная присоединенная длина в (2) будет пропорциональна диаметру отверстия, то нелинейное сопротивление оказывается независимым от диаметра отверстия. Это согласуется с законом Бернулли, из которого следует, что сопротивление отверстия  $R = \alpha\rho U$ , где коэффициент  $\alpha$  порядка единицы (см., напр., [6]). Таким

образом, вопрос о влиянии размеров отверстия на нелинейное сопротивление остался открытым.

Отчасти такое положение дел было обусловлено тем, что, как показано дальнейшими исследованиями, для того чтобы сравнивать сопротивления трения отверстий разных размеров, необходимо при построении соответствующих графических зависимостей переходить к безразмерным параметрам, а именно к безразмерным колебательной скорости, сопротивлению трения и относительным геометрическим размерам отверстий. Подробно вопросы нормировки этих параметров и использования с этой целью различных безразмерных комплексов рассматривались в [6]. В этой работе рассматривалось не само вязкое сопротивление  $R$ , а его безразмерный аналог  $R/(\rho\sqrt{v\omega})$ , что позволило получать характеристики сопротивления, не зависящие от частоты. Кроме того, с целью унификации получаемых характеристик было предложено рассматривать зависимость сопротивления не от скорости  $U$ , а также от безразмерного параметра  $U/\sqrt{v\omega}$ . Позже в [7, 8] такие безразмерные параметры были использованы при исследовании акустического импеданса отверстий на нелинейных режимах.

Недостатком предложенного в [6] подхода является то, что при получении безразмерного сопротивления не используется такой важный параметр, как диаметр отверстия, как это предлагалось, например, Ингардом. Вследствие этого связь между сопротивлением отверстия и его диаметром остается завуалированной. Еще одним недостатком такого подхода является то, что в рассмотренных выше работах при получении безразмерного сопротивления трения используется параметр  $\rho\sqrt{v\omega}$ , тогда как обычно в акустике с этой целью применяется параметр  $\rho c$ , где  $c$  – скорость звука в воздухе. Именно безразмерное сопротивление  $\bar{R} = R/(\rho c)$  определяют через коэффициент отражения по результатам измерений в импедансной трубе, и именно его используют в дальнейшем при математическом моделировании акустических резонаторов.

Целью настоящей работы является получение надежных экспериментальных данных относительно влияния амплитуды колебательной скорости на сопротивление трения в отверстиях разного диаметра как основы для построения в последующем нелинейной математической модели резонатора Гельмгольца.

Измерения проводились в импедансной трубе с внутренним диаметром  $d = 99$  мм методом двух микрофонов. В торцевом сечении трубы устанавливалась перегородка с отверстием, диаметр

которого  $d_0$  варьировался от 4 до 10 мм. Толщина перегородки составляла 2 мм. Для возбуждения звука в импедансной трубе использовался узкополосный ЛЧМ-сигнал с шириной полосы 10 Гц и центральной частотой  $f_0$ . При этом уровни звукового давления в импедансной трубе могли изменяться в диапазоне от 85 до 135 дБ. Звуковое давление измерялось парой 1/4-дюймовых конденсаторных микрофонов, сигналы с которых подвергались спектральному анализу и последующей обработке с целью получения безразмерного акустического импеданса отверстия, действительная часть которого определяет сопротивление трения в нем. Подробнее методика проведения измерений описана в [9].

Будем рассматривать безразмерное акустическое сопротивление отверстия  $\bar{R} = R/(\rho c)$ , представляя его в виде суммы линейной  $\bar{R}_l$  и нелинейной  $\bar{R}_{nl}$  составляющих  $\bar{R} = \bar{R}_l + \bar{R}_{nl}$ . Безразмерное линейное сопротивление  $\bar{R}_l = 2k\delta_v(l/d_0 + \bar{\Delta}_v)$ , где  $k = \omega/c$  – волновое число;  $\delta_v = (2\nu/\omega)^{1/2}$  – глубина пограничного слоя в отверстии. При этом безразмерная присоединенная длина  $\bar{\Delta}_v$  зависит, как показано в [10], от геометрических параметров отверстия. Что касается нелинейной составляющей сопротивления, то здесь, в отличие от формулы (2), пока не делается никаких предположений относительно зависимости этой составляющей от вязкости и геометрических параметров отверстия.

На рис. 1 представлены графические зависимости безразмерного акустического сопротивления  $\bar{R}$  отверстий разных диаметров от среднеквадратического значения колебательной скорости  $U$  в них для двух значений частоты  $f_0$ . Особенности определения  $U$  в выбранном частотном диапазоне ЛЧМ-сигнала рассмотрены в [9]. Как и следовало ожидать, начиная с определенного значения колебательной скорости  $U$  сопротивление отверстия, точнее, его нелинейная составляющая  $\bar{R}_{nl}$  начинает интенсивно увеличиваться с ростом  $U$ . Однако неожиданным здесь оказалось то, что независимо от частоты  $f_0$  более интенсивно рост сопротивления происходил для отверстий большего диаметра. Вследствие этого на нелинейном режиме при выбранном значении колебательной скорости в отверстии большему диаметру отверстия соответствовало и большее акустическое сопротивление, тогда как на линейном режиме имеет место обратная картина: акустическое сопротивление обратно пропорционально его диаметру.

Далее более детально исследовалось только нелинейное сопротивление  $\bar{R}_{nl}$ , которое определялось путем вычитания из общего сопротивле-

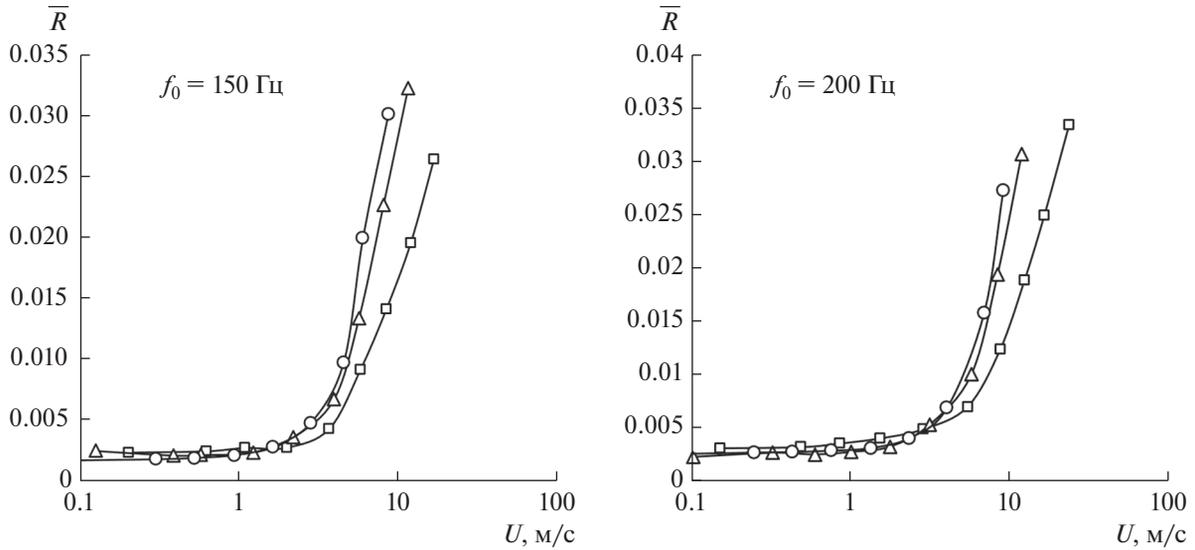


Рис. 1. Зависимость безразмерного сопротивления от колебательной скорости в отверстиях диаметром  $d_0 = 4$  мм ( $\square$ ), 7 мм ( $\triangle$ ), 10 мм ( $\circ$ ).

ния  $\bar{R}$  его линейной части  $\bar{R}_l$ , равной общему сопротивлению при малых значениях колебательной скорости  $U$ . При этом было введено в рассмотрение приведенное нелинейное сопротивление  $\tilde{R}_{nl} = \bar{R}_{nl}/d_0$ , пропорциональное безразмерному параметру  $l_0/d_0$ , где  $l_0$  — единичная длина,  $l_0 = 10^{-3}$  м. Зависимости приведенного сопротивления  $\tilde{R}_{nl}$  от колебательной скорости  $U$  для рассмотренных диаметров  $d_0$  и частот  $f_0$  представлены на рис. 2. Оказалось, что использование данной нормировки позволило прийти к характеристике  $\tilde{R}_{nl}$ , практически не зависящей от диаметра отверстия. Это обстоятельство позволяет сделать вывод, что нелинейное сопротивление отверстия пропорционально его диаметру, так что можем записать

$$\bar{R}_{nl} = \frac{d_0}{l_0} \tilde{R}_{nl}. \quad (3)$$

Следует отметить, что формально при определении приведенного нелинейного сопротивления и, соответственно, в формуле (3) вместо единичной длины  $l_0$  можно было использовать толщину отверстия  $l$ . Однако поскольку в данной работе толщина отверстия  $l$  была фиксированной, определить, как в действительности этот параметр влияет на сопротивление трения, можно будет только после дополнительных экспериментов с отверстиями разной толщины. Некоторые общие замечания по этому поводу были сделаны Ингардом [1].

Отметим также, что хотя приведенное сопротивление  $\tilde{R}_{nl}$  и не зависит от диаметра отверстия, но, как следует из рис. 2, его зависимость от частоты  $f_0$  сохранилась. Для того чтобы прийти к более универсальным характеристикам, введем в рассмотрение, следуя [6–8], безразмерную скорость  $\bar{U} = U/\sqrt{\nu\omega}$ . Графические зависимости приведенного сопротивления  $\tilde{R}_{nl}$  от безразмерной скорости  $\bar{U}$  представлены на рис. 3 и показывают, что эти

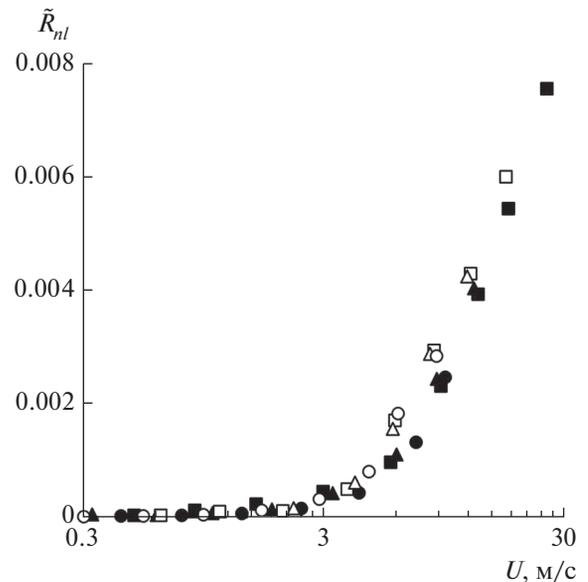
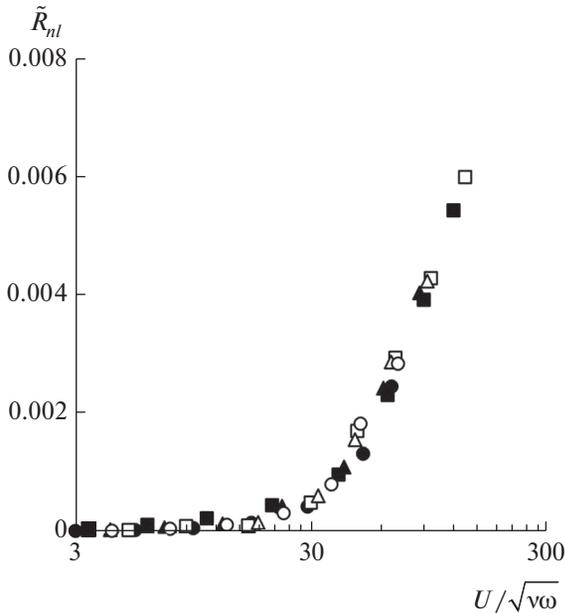
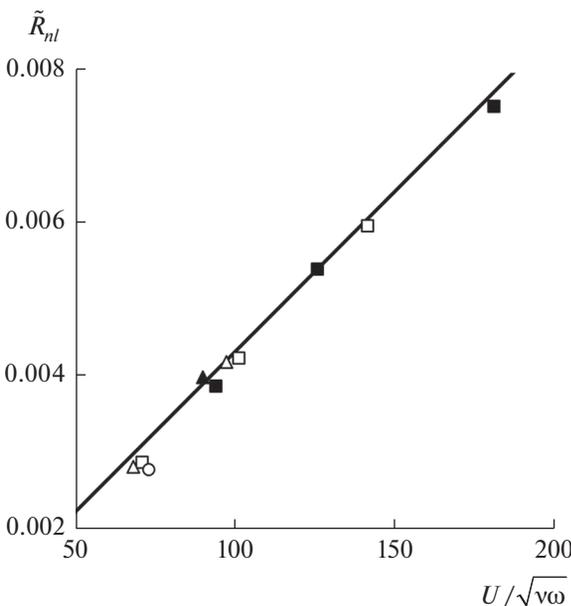


Рис. 2. Зависимость приведенного нелинейного сопротивления от колебательной скорости в отверстиях и частоты:  $d_0 = 4$  мм ( $\square$ ), 7 мм ( $\triangle$ ), 10 мм ( $\circ$ ) и  $f_0 = 150$  Гц;  $d_0 = 4$  мм ( $\blacksquare$ ), 7 мм ( $\blacktriangle$ ), 10 мм ( $\bullet$ ) и  $f_0 = 200$  Гц.



**Рис. 3.** Зависимость приведенного нелинейного сопротивления от безразмерной колебательной скорости в отверстии и частоты:  $d_0 = 4$  мм (□), 7 мм (△), 10 мм (○) и  $f_0 = 150$  Гц;  $d_0 = 4$  мм (■), 7 мм (▲), 10 мм (●) и  $f_0 = 200$  Гц.



**Рис. 4.** Зависимость приведенного нелинейного сопротивления от высоких значений безразмерной колебательной скорости в отверстии и частоты:  $d_0 = 4$  мм (□), 7 мм (△), 10 мм (○) и  $f_0 = 150$  Гц;  $d_0 = 4$  мм (■), 7 мм (▲), 10 мм (●) и  $f_0 = 200$  Гц; аппроксимация (—).

зависимости практически перестали зависеть от частоты.

На рис. 4. приведена зависимость приведенного сопротивления  $\tilde{R}_{nl}$  от высоких значений безразмерной скорости  $\bar{U}$ . Видно, что при использо-

вании линейной шкалы по оси ординат эта зависимость хорошо аппроксимируется линейной функцией

$$\tilde{R}_{nl} = (8.3\bar{U} + 20) \times 10^{-5}.$$

Таким образом, проведенные в импедансной трубе измерения акустического импеданса отверстия показали, что на нелинейных режимах, при высоких уровнях колебательной скорости в отверстии, нелинейное сопротивление отверстия начинает существенно возрастать и оказывается, в противоположность линейному сопротивлению, пропорциональным диаметру отверстия. Экспериментально полученная зависимость приведенного сопротивления отверстия от безразмерной колебательной скорости в отверстии аппроксимируется линейной функцией, которая в дальнейшем будет использована при разработке нелинейной математической модели резонатора Гельмгольца.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ingard U.* On the theory and design of acoustic resonators // *J. Acoust. Soc. Am.* 1953. V. 25. № 6. P. 1037–1061.
2. *Sivian L.J.* Acoustic impedance of small orifices // *J. Acoust. Soc. Am.* 1935. V. 7. № 3. P. 94–101.
3. *Bies D., Wilson O.* Acoustic impedance of a Helmholtz resonator at very high amplitude // *J. Acoust. Soc. Am.* 1957. V. 29. № 6. P. 711–714.
4. *Ingard U., Ising H.* Acoustic nonlinearity of an orifice // *J. Acoust. Soc. Am.* 1967. V. 42. № 1. P. 6–17.
5. *Эпштейн В.Л., Руденко А.Н., Жемуранов А.П.* Нелинейное акустическое сопротивление отверстия // *Авиационная акустика / Труды ЦАГИ.* Вып. 1806. М., 1976. С. 74–80.
6. *Panton R.L., Goldman A.L.* Correlation of nonlinear orifice impedance // *J. Acoust. Soc. Am.* 1976. V. 60. № 6. P. 1390–1396.
7. *Dickey N.S., Selamet A.* Acoustic nonlinearity of a circular orifice: An experimental study of the instantaneous pressure/flow relationship // *Noise Control Eng. J.* 1998. V. 46. № 3. P. 97–107.
8. *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. V. 108. № 5. P. 1068–1081.
9. *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.
10. *Комкин А.И., Миронов М.А., Быков А.И.* Поглощение звука резонатором Гельмгольца // *Акуст. журн.* 2017. Т. 63. № 4. С. 356–363.