АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2003, том 49, № 1, с. 130–132

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 534.23

МОЩНОСТЬ ИЗЛУЧАТЕЛЯ В ПРИСУТСТВИИ УПРУГИХ РАССЕИВАТЕЛЕЙ

© 2003 г. Т. М. Томилина

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН
101990 Москва, Малый Харитоньевский пер., 4
E-mail: tatiana@imash.ac.ru

Поступила в редакцию 10.09.2002 г.

В настоящей работе исследуются задачи, где источник звука конечных размеров взаимодействует с упругой структурой через среду, и приводятся новые результаты, которые показывают, как присутствие упругих рассеивателей влияет на мощность излучения самого источника. Обсуждаются условия, при которых мощность излучения увеличивается на порядки по сравнению с ее значением для источника, излучающего в безграничном пространстве. Эти исследования были выполнены под влиянием работ Л.М. Лямшева [1–3], в которых он изучал экспериментально и теоретически взаимодействие акустических полей с упругими структурами (пластинами и оболочками) и указал на существенное усиление рассеянного звука за счет резонансных свойств такой связной системы. В данной работе рассматриваются задачи с активным источником и пассивным рассеивателем конечных размеров, и задача решается с учетом многократных отражений между ними. Задача возникла из необходимости описания акустической модели для некоторых механических источников звука, которые представляют собой колеблющиеся элементы машин и конструкций, взаимодействующие между собой и с другими упругими конструкциями через среду и излучающие звук. Рассмотрение более сложной модели таких источников, отличной от точечного источника, имеющей протяженную поверхность, пусть даже и компактной геометрии, выявило новые эффекты, которые удалось описать количественно.

Эффект увеличения/уменьшения акустической мощности источника, излучающего вблизи отражателей и рассеивателей, качественно известен давно, первые количественные оценки были сделаны для точечного источника. Например, в работе [4] рассмотрена задача о монополе вблизи твердой границы, в двугранном и трехгранном углах, а в книге [5] – в плоском волноводе с двумя твердыми параллельными стенками. Если учесть, что влияние твердых стенок можно заменить мнимыми источниками в свободном пространстве, то все решенные задачи эквивалентны излучению группы точечных источников, а единственным и не самым эффективным физическим механизмом увеличения мощности является интерференция волн. Так, мощность монополя вблизи твердой стенки может увеличиваться в два раза по сравнению с мощностью в свободном пространстве, а в трехгранном угле – в восемь раз (по числу мнимых источников).

Первые результаты изучения этой характеристики для источника конечных размеров в работе [6], где рассматривалось излучение колеблющегося тонкого диска вблизи твердой стенки, показали, что мощность протяженного источника может изменяться в значительно больших пределах и на отдельных частотах достигать порядка, а физическим механизмом, объясняющим этот эффект, является "резонанс полости" – резонанс объема среды между диском и стенкой. Изучение этого механизма на другой модели – сфере, колеблющейся вблизи жестких поверхностей: плоскости, двугранного и трехгранного углов [7], показало, что даже для источника компактной геометрии величина эффекта усиления может достигать 20 в зависимости от формы колебаний сферы.

В данной работе для изучения влияния резонансных свойств упругого рассеивателя на мощность излучения источника была решена задача об излучении бесконечного цилиндра (радиуса a) с заданным распределением скорости колебаний его поверхности вблизи свободно опертой упругой полосы (шириной l, толщиной h). В этой задаче изгибные колебания возбуждались акустическим давлением, создаваемым на поверхности полосы активным источником. На рис. 1а показана частотная зависимость безразмерной величины PR – отношения полного потока мощности источника в присутствии полосы к потоку мощности того же источника, излучающего в безграничном пространстве, для коэффициента потерь в материале полосы 0.01. Из графика видно, что значительное усиление мощности достигается в районе первой резонансной частоты $ka = 0.3$ изгибных колебаний полосы.

Эффект резонансного рассеяния полосой существенно зависел от окружных форм колебаний цилиндра (распределение колебательной скорости v по окружности принималось в виде $v = v_0\cos(m\varphi)$ или $v = v_0\sin(m\varphi)$. На первой резонансной частоте изгибных колебаний полосы при пульсирующем цилиндре ($m = 0$) и осциллирующем цилиндре ($m = 1$) мощность излучения увеличивалась соответственно в 1.7 и 4.8 раза, для $m = 2$ примерно в 180 раз. Для выделения эффекта резонансного рассеяния на рис. 1б приведена частотная зависимость отношения мощности излучения источника вблизи упругой полосы к его мощности вблизи абсолютно жесткой полосы.

Усиление мощности на резонансах объема среды между источником и рассеивателем также имеет место в этой задаче, но не столь значительны, как в случае колебаний диска, увеличение всего в 2.7 раза из-за компактной геометрии источника. При удалении источника от рассеивателя эффект пропадает.

В работе также был установлен интересный эффект, имеющий место на низких частотах для источников с высокими формами колебаний их поверхности и названный эффектом понижения порядка источника: источник с формой колебаний более высокого порядка вблизи границ имеет мощность, соответствующую источнику меньшего порядка в безграничном пространстве. Например, источник конечных размеров квадрупольного типа вблизи границы, твердой или упругой, излучает как монополь и т.п. Акустическая мощность увеличиваются на порядки из-за колебаний среды вблизи источника. Эффект тем сильнее, чем выше форма колебаний поверхности источника. Этот результат хорошо виден на рис. 1а.

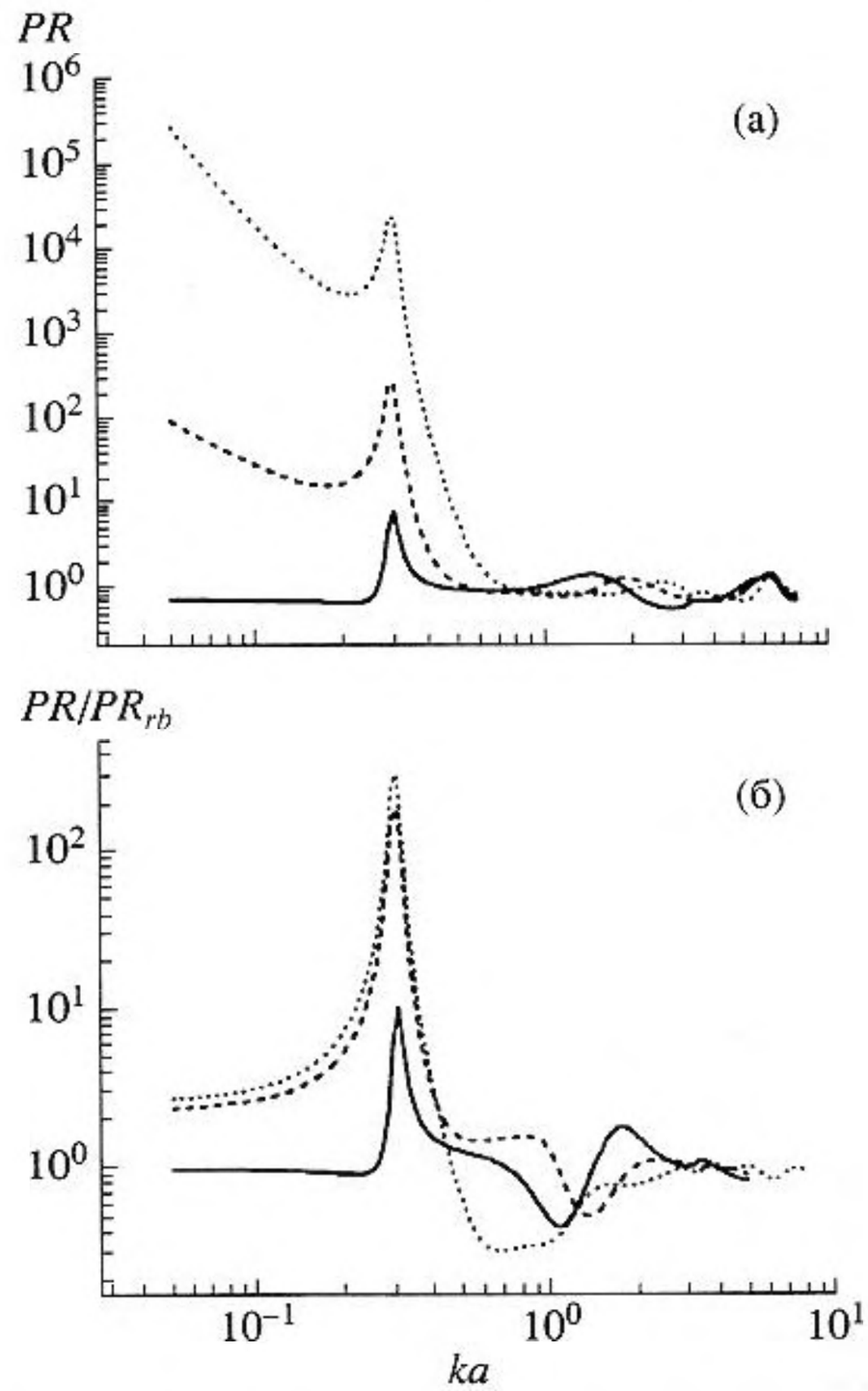

Рис. 1. а – Зависимость усиления мощности от частоты для цилиндра радиуса a, колеблющегося на расстоянии $H = 0.5a$ от тонкой упругой полосы шириной $l = 2a$; распределение радиальной колебательной скорости по окружности цилиндра $v_0(\varphi) = v_0\sin(\varphi)$ (сплошная линия), $v_0 = v_0\cos(2\varphi)$ (штриховая линия), $v_0(\varphi) = v_0\sin(3\varphi)$ – пунктир. б – Нормированные характеристики.

Чтобы убедиться, что усиление мощности источника в присутствии рассеивателя имеет место в реальных ситуациях, был проведен лабораторный эксперимент. В качестве источника использовались два динамических громкоговорителя, встроенных в прямоугольную деревянную пластину.

Громкоговорители могут работать в фазе или в противофазе, имитируя источники дипольного и квадрупольного типа. В качестве рассеивателя использовалась металлическая труба, открытый конец которой помещался вблизи источника. Установка была собрана в большом зале, мощность излучения измерялась интенсиметром в 162 точках на полусфере диаметром 2 м, охватывающей источник с рассеивателем. Основные результаты эксперимента следующие.

На первой резонансной частоте трубы ($f_1 = 92$ Гц) имеет место увеличение полной мощности источника на два порядка по сравнению с излучением в отсутствии рассеивателя. Усиление мощности для источника квадрупольного типа (динамики работают в противофазе) выше, чем у источника дипольного типа. Причина в том, что у квадруполя более мощное ближнее поле, которое сильнее возбуждает резонансные колебания трубы, а труба эффективнее переизлучает звук, преобразуя, таким образом, часть реактивной энергии ближнего поля в активную энергию дальнего поля. На рис. 2 показана зависимость усиления мощности в дБ на резонансной частоте f_1 от расстояния d между источником и рассеивателем. Как видно из рис. 2, усиление мощности растет при уменьшении расстояния и увеличении ближнего поля.

Аналогичные результаты были получены и для других задач, в частности для трехмерной задачи об усилении мощности излучения сферического источника вблизи изгибно-колеблющейся круглой пластинки. Получение достоверных количественных результатов при решении таких сложных с вычислительной точки зрения задач в значительной мере было обусловлено использо-

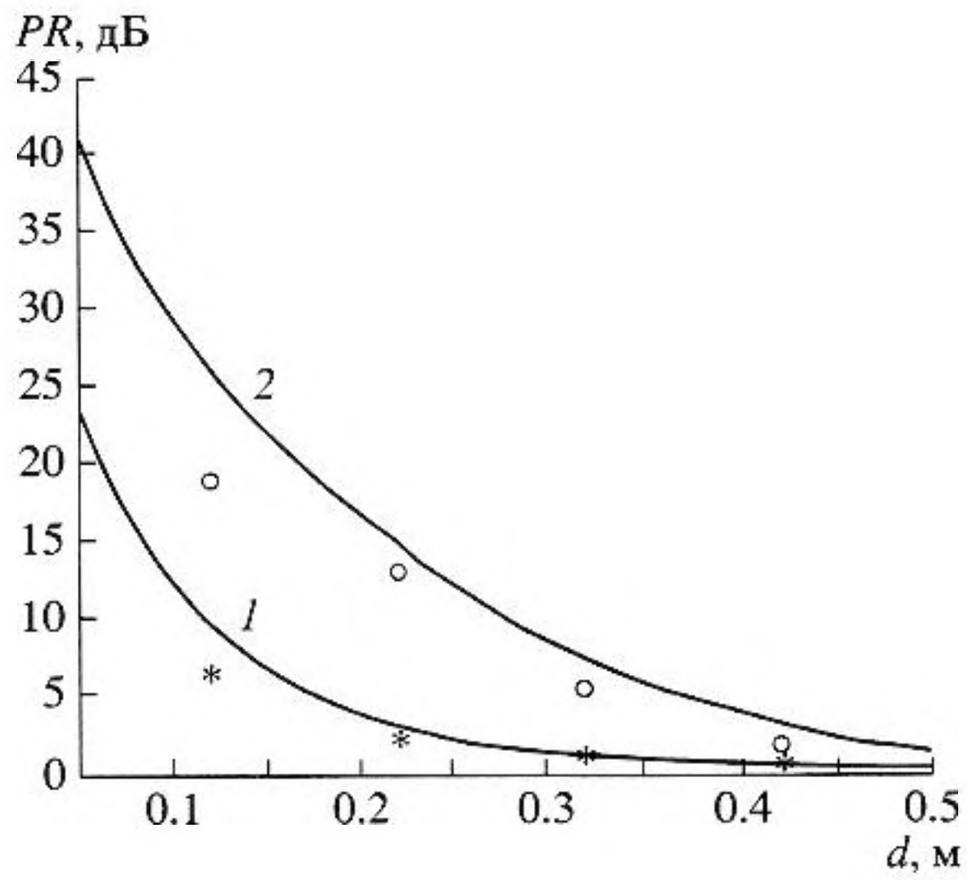

Рис. 2. Усиление мощности источника дипольного типа (теория – *1* и эксперимент – *) и квадрупольного типа (расчет – *2* и эксперимент – o) в зависимости от расстояния до рассеивателя.

ванием эффективного метода численного решения с контролируемой точностью [9, 10].

Результаты исследований влияния упругих рассеивателей на величину акустической мощности излучателя, изложенные в данной работе, имеют важное значение для корректного определения энергетических характеристик реальных источников, используемых, например, в методе SEA. Они важны также для разработки источников с заданными акустическими свойствами, путем влияния на акустическую обстановку, в которой они работают, повышая или уменьшая их мощность излучения за счет упругих свойств и взаимного расположения рассеивателей. Результаты могут быть полезны для понимания физических механизмов звукообразования в сложных промышленных источниках шума.

Работа выполнена в рамках программы государственной поддержки научных школ (грант № 00-15-96004, К.В. Фролов).

Автор выражает благодарность Ю.И. Бобровницкому за творческое обсуждение результатов в процессе проведения исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лямшев Л.М.* Отражение звука тонкими пластинками и оболочками в жидкости. М.: Изд. АН СССР, 1955. 71 с.
2. *Лямшев Л.М.* Об усилении незеркально отраженной волны // Акуст. журн. 1969. Т. 15. № 2. С. 303–304.
3. *Лямшев Л.М.* Незеркальное отражение, резонансное рассеяние и излучение звука пластинками и оболочками в воде // Акуст. журн. 1999. Т. 45. № 5. С. 693–716.
4. *Waterhouse R.V.* Output of a sound source in a reverberation chamber and other reflecting environments // J. Acous. Soc. Amer. 1958. V. 30. № 1. P. 4–13.
5. *Morse P.M., Ingard K.V.* Theoretical Acoustics. Princeton: McGraw–Hill Book Company, 1968.
6. *Tomilina T.M.* Amplification of the total power flow of a noise source operating near elastic bounds // Proc. INTER–NOISE96. Liverpool, UK, 1996. P. 3149–3153.
7. *Яшкин В.Б.* Мощность излучения сферического источника звука вблизи отражающих поверхностей // Акуст. журн. 1998. Т. 44. № 4. С. 524–531.
8. *Tomilina T.M., Bobrovnitskii Yu.I., Yuashkin V.B., Kochkin A.A.* Power output of noise source operating near elastic scatters of finite dimensions // J. of Sound and Vibration. 1999. V. 226. № 2. P. 285–304.
9. *Tomilina T.M.* Fast numerical method for prediction of sound fields radiated from vibrating structures // Revue francaise de mechanique. 1991. Numero special. P. 538–548.
10. *Бобровницкий Ю.И., Томилина Т.М.* Общие свойства и принципиальные ошибки метода эквивалентных источников // Акуст. журн. 1995. Т. 41. № 5. С. 737–750.