АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXVI 1980 Вып. 1

УДК 534.833

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТРАЖАТЕЛЕЙ В ВОЛНОВОДЕ

М. А. Кутищев

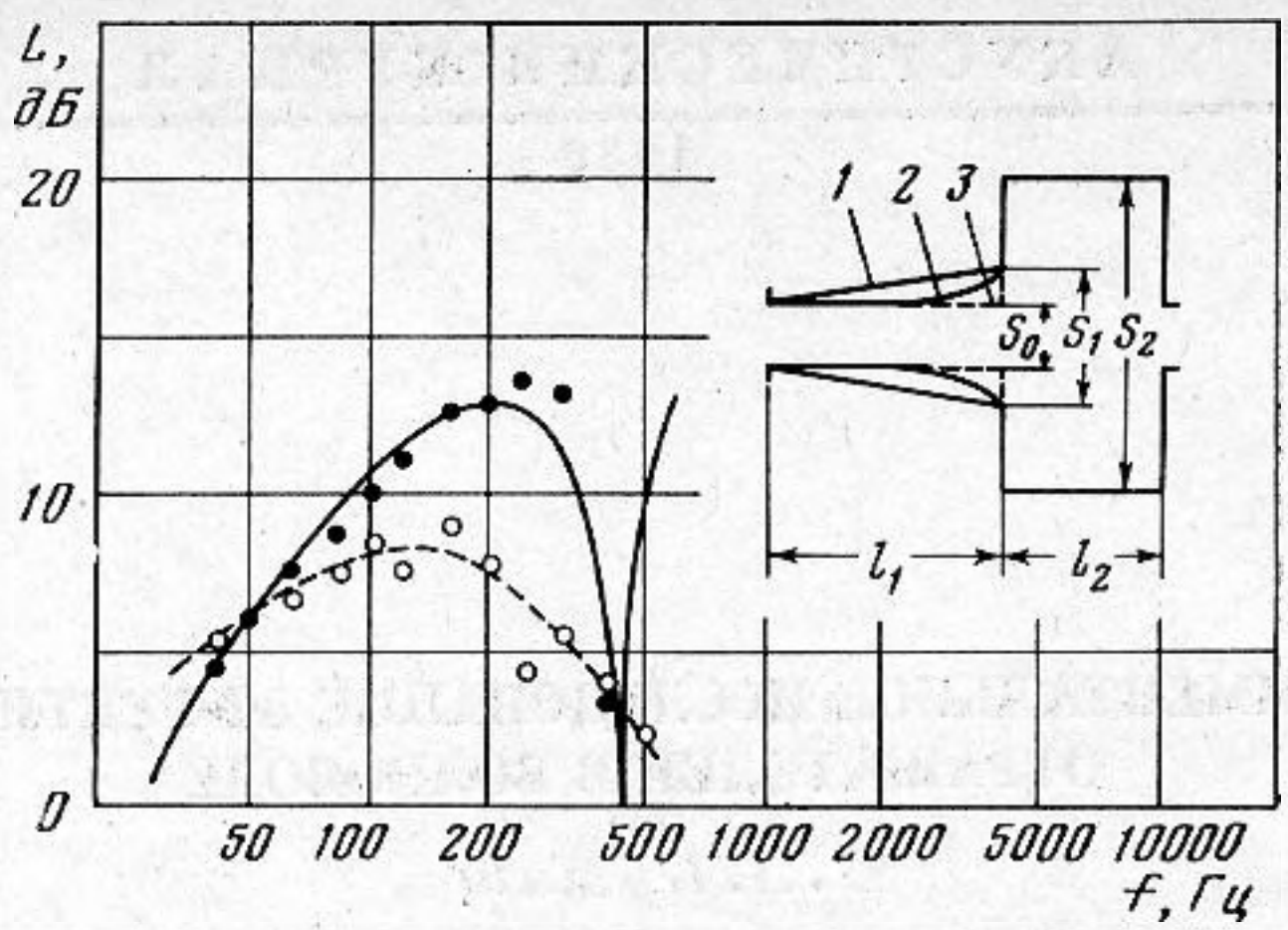
Приведены результаты экспериментального исследования камерных и резонансных отражателей в волноводе. Показано влияние формы, размеров и способа установки отражателей на характеристики их звукоизоляции. Экспериментальные результаты сравниваются с полученными теоретически. Даны рекомендации по практическому применению отражателей для звукоизоляции.

Для уменьшения передачи шума по волноводу широко используют звукоизолирующие камерные и резонансные отражатели. Результаты соответственных теоретических и экспериментальных исследований достаточно полно изложены в обзорной работе [1]. Однако при практическом применении таких устройств возникает ряд вопросов, недостаточно освещенных в имеющихся публикациях. В связи с этим нами было проведено экспериментальное исследование отражателей. Некоторые полученные результаты излагаются ниже. Стендовая установка была изготовлена в соответствии с рекомендациями ISO [2] и позволяла производить измерения как при озвучивании полосами частот, так и чистыми тонами.

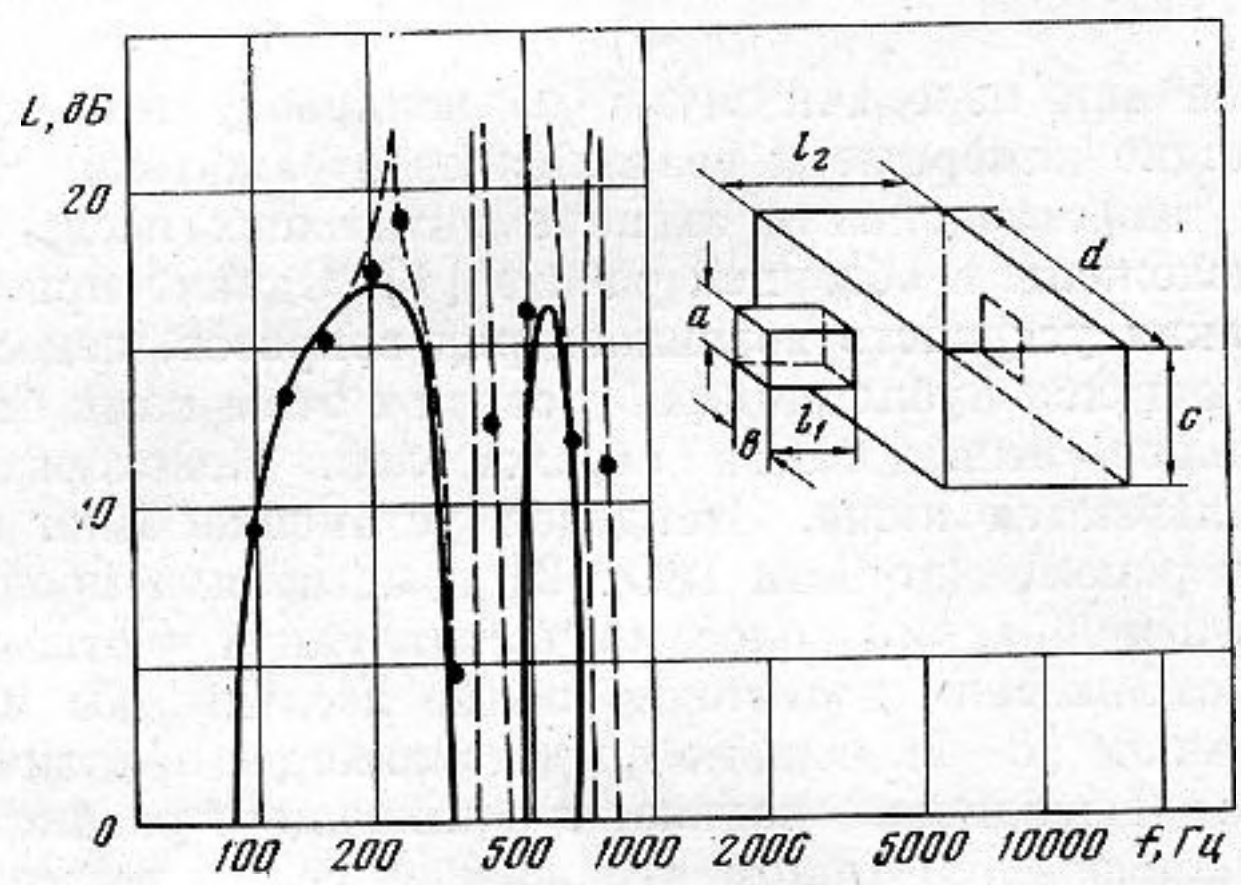
Камерные отражатели достаточно полно исследованы и теоретически и экспериментально [3—4]. Однако представляющее практический интерес влияние формы подводящего канала, соединяющего расширение с волноводом, на звукоизоляцию такого отражателя не исследовалось. Отсутствуют также данные об эффективности расширения прямоугольного сечения, размеры которого не малы по сравнению с длиной заглушаемой волны.

В связи с этим нами был изготовлен цилиндрический отражатель диаметром $d=0{,}7$ м, длиной $l=0{,}4$ м и три типа элементов, соединяющие этот отражатель с волноводом: элементы с постоянной и переменной площадью поперечного сечения (конической и экспоненциальной формы). Эксперименты показали, что при длине этих элементов, меньшей длины отражателя, влияние их формы и поперечных размеров на звукоизоляцию не существенно. При больших длинах этих элементов звукоизоляция в пределах первой полосы заглушения падает по мере приближения площади широкого сечения к площади отражателя. Изменение эффективности происходит при этом в соответствии с отношением S_1/S_2 и не зависит от закона, по которому изменяется сечение соединения. При одинаковых длинах и одинаковом соотношении S_1/S_2 звукоизоляция при конической и при экспоненциальной форме элементов оказалась практически одинаковой. Заметного различия не было отмечено и при экспоненциальном соединении, критическая частота которого находилась в пределах полосы заглушения (мы исследовали элементы с критическими частотами до 300 Гц) (фиг. 1).

Полученные результаты соответствуют различному поведению соединительного канала переменного сечения, имеющего длину, меньшую или



Фиг. 1. Влияние формы и размеров соединения отражателя с волноводом на звукоизоляцию: сплошная линия – расчетная характеристика первой полосы звукоизоляции при соединении постоянного сечения, точки – экспериментальные данные; кружками нанесена звукоизоляция при $S_1=S_2$ для конического и экспоненциального соединения. *1* – коническое, *2* – экспоненциальное, *3* – цилиндрическое соединения

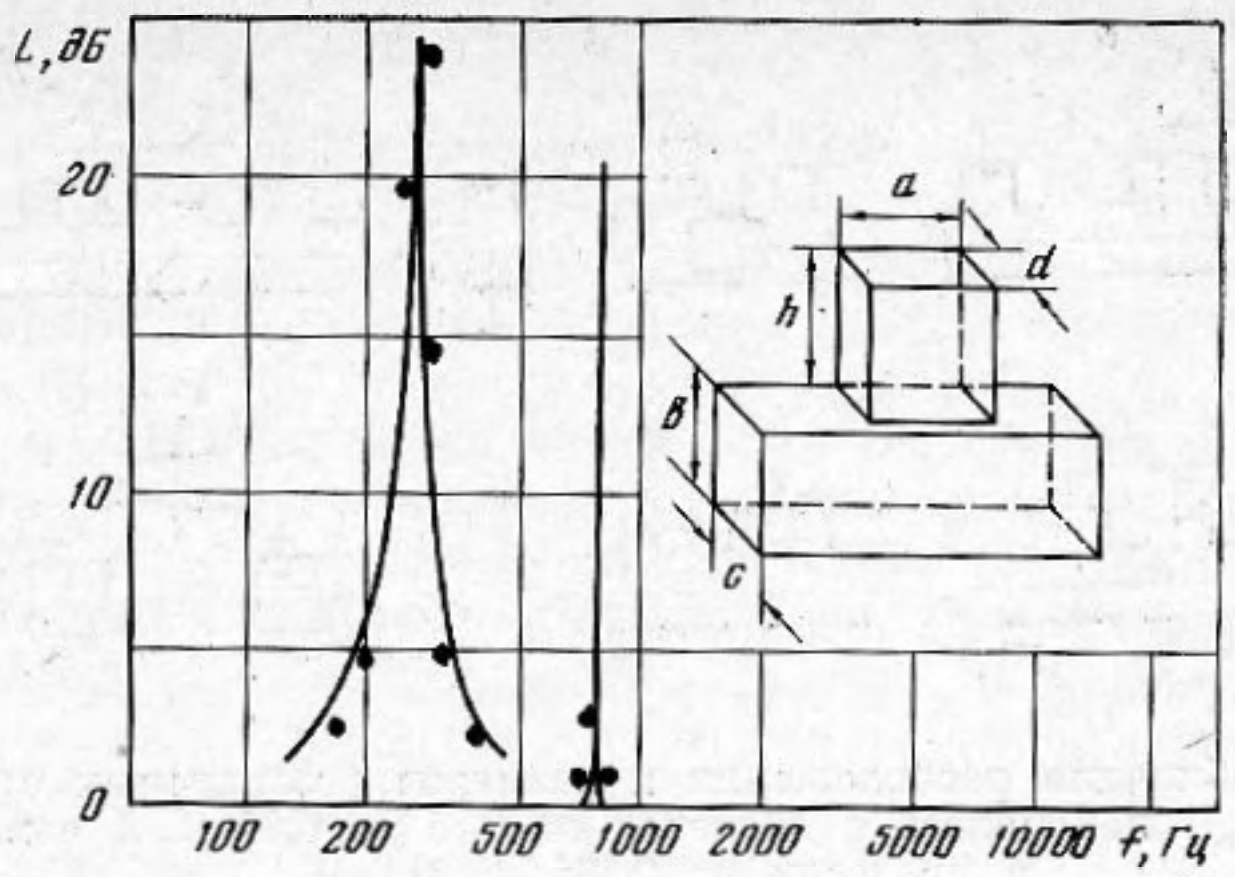


Фиг. 2. Звукоизоляция акустической ячейки прямоугольного сечения (a=0,3 м, b=0,3 м, d=1,25 м, c=0,4 м, l_2=0,5 м); штриховая линия – поправка, учитывающая поперечные размеры расширения, точки – экспериментальные данные

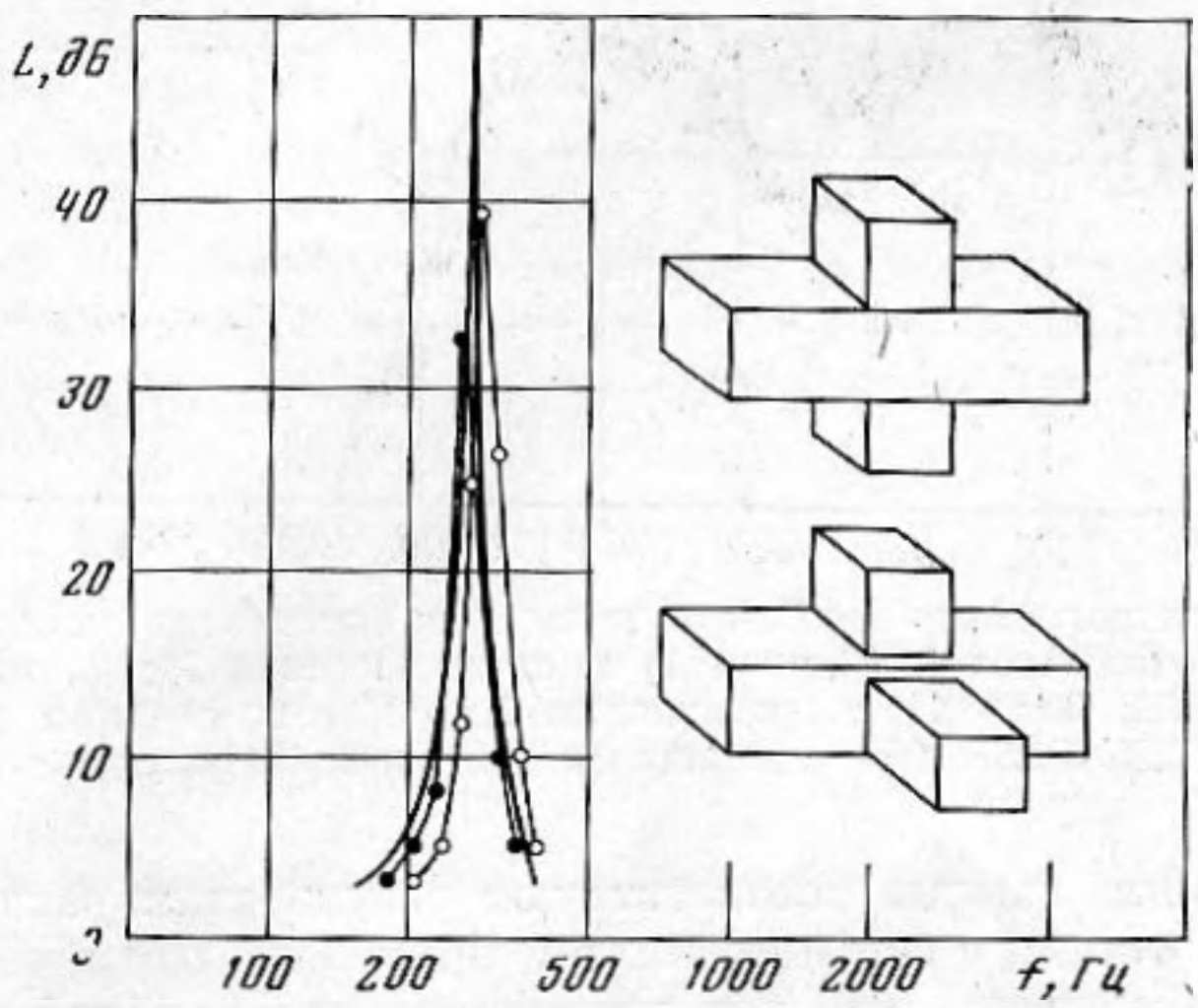
соизмеримую с длиной волны заглушаемого звука. В первом случае соединительный канал несколько изменяет присоединенную массу входного отверстия и практически не влияет на эффективность отражателя. Во втором случае этот канал ведет себя как рупор, т. е. как согласующий элемент, уменьшающий отражательную способность расширительной камеры. Вместе с тем отсутствие заметного различия в эффективности отражателя при коническом и экспоненциальном соединении в полосе частот, лежащей ниже критической, требует дополнительного анализа.

Для исследования звукоизоляции отражателя прямоугольного поперечного сечения, размеры которого соизмеримы с длинами заглушаемых волн, была изготовлена акустическая ячейка, основные геометрические параметры которой показаны на фиг. 2. Здесь же дана эффективность этой ячейки.

Сплошной линией показана звукоизоляция, определенная без учета соотношений поперечных размеров камеры и длин волн в исследуемом диапазоне частот. Штриховой линией дана звукоизоляция, учитывающая поперечные размеры камеры и определенная по формуле, полученной



Фиг. 3. Звукоизоляция отростка: сплошные линии – расчетные, точки – экспериментальные данные, $h=0{,}24$ м, $a=d=0{,}265$ м, $b=c=0{,}3$ м

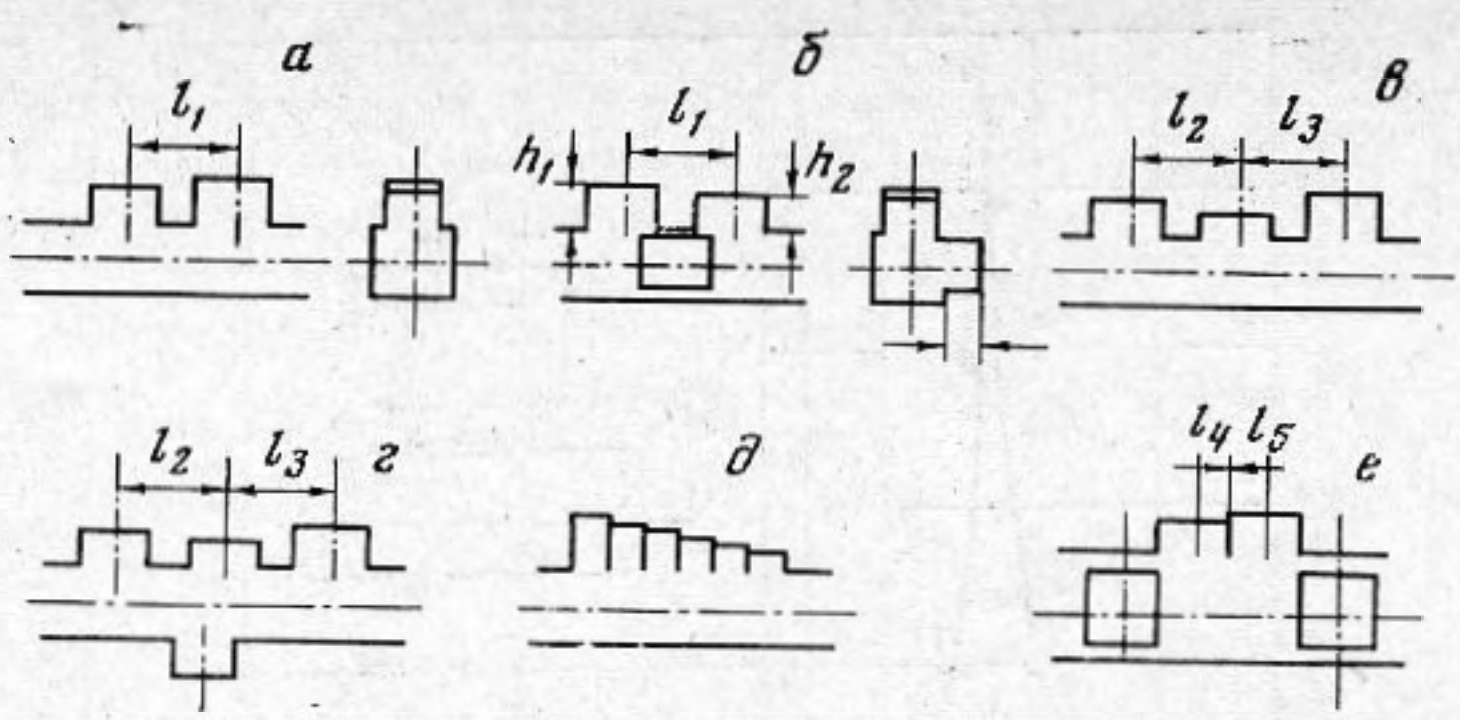


Фиг. 4. Звукоизоляция двух отростков, расположенных напротив друг друга (точки – экспериментальные данные) и расположенных перпендикулярно друг другу (кружки – экспериментальные данные)

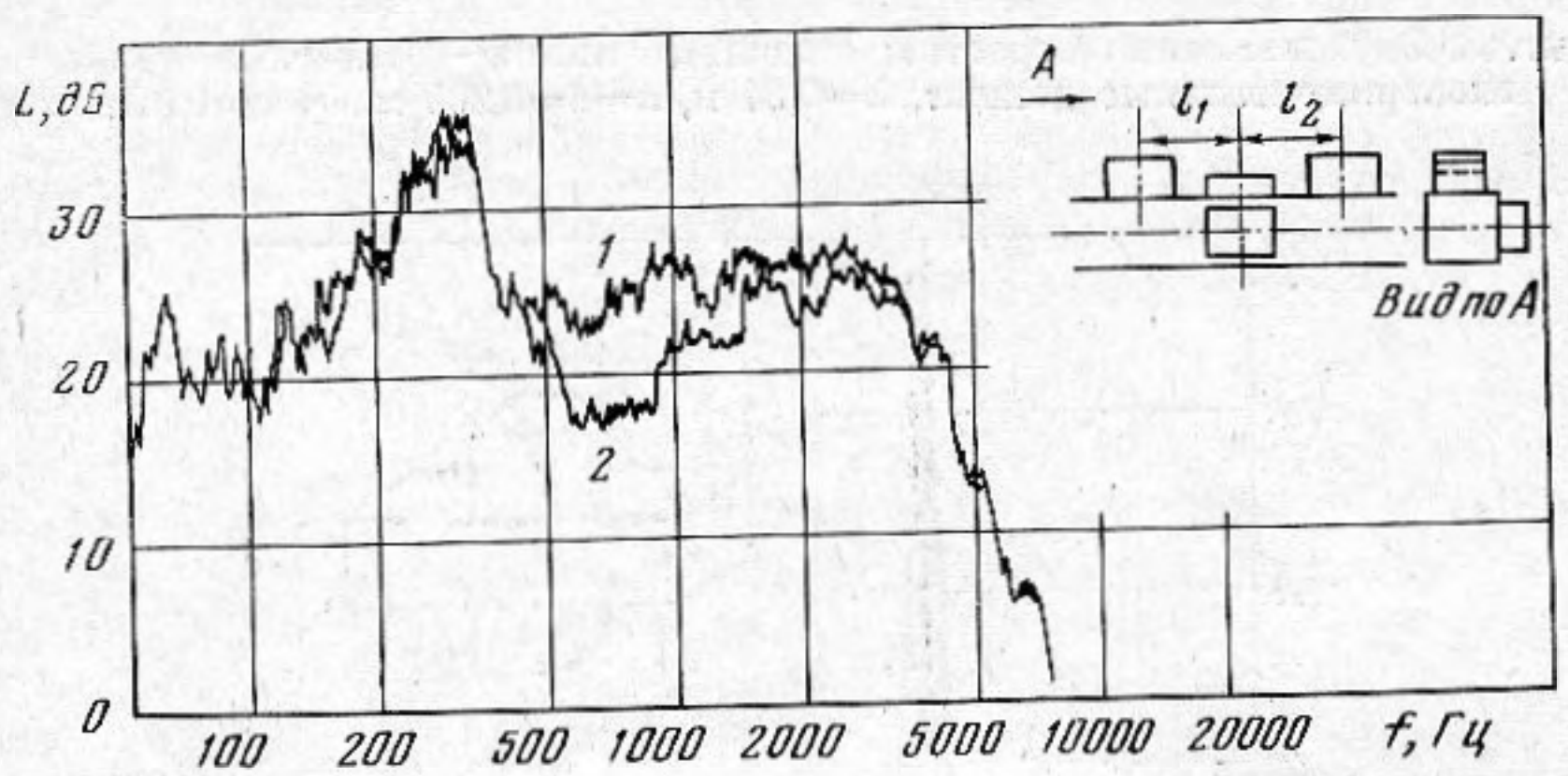
нами на основе обобщения формул Шапиро [3] на случай расширительной камеры с прямоугольным поперечным сечением. Расчет по этой формуле лучше совпадает с экспериментальными данными, чем расчет, произведенный по формуле, не учитывающей поперечные размеры камеры.

Полученные нами данные по звукоизоляции камерных отражателей вместе с данными работ [1–4] дают информацию, необходимую для применения этого типа отражателей на практике.

Резонансные отражатели на основе использования четвертьволновых отростков исследовались в соответствии с теоретическими разработками, изложенными в работе [5]. Некоторые положения этой работы экспериментально подтверждаются данными, полученными в работе [6]. Однако широкое применение таких отражателей на практике сдерживается относительно узким частотным диапазоном их звукоизоляции. В самом деле, на фиг. 3 приведены результаты измерения звукоизоляции отростков с поперечным сечением, равным $0{,}24\times0{,}24$ м^2, установленных перпендикулярно волноводу сечением $0{,}3\times0{,}3$ м^2. При длине отростка $h=0{,}27$ м



Фиг. 5. Комбинации расположения и размеров резонансных отростков в волноводе; l изменялось в пределах от 0,75 до 0,15 м, h изменялось в пределах от 0,265 до 0,1 м



Фиг. 6. Спектрограммы звукового поля в волноводе до установки резонансных отражателей (кривая *1*) и после (кривая *2*); длины отростков: 0,09; 0,08; 0,1; 0,11 м, расстояния $l_{1,2}$=0,25 м, сечения отростков 0,265×0,265 м^2 – одинаковые для всех отростков

экспериментальные данные соответствуют результатам расчета, произведенным в соответствии с соотношениями, приведенными в работе [5]. Эти соотношения показывают, что при увеличении резонансной частоты отростка диапазон звукоизоляции сужается. Эксперимент при длине h=0,11 м хорошо иллюстрирует такое сужение диапазона звукоизоляции при приближении относительной ширины волновода k_0b/π к 1 ($k_0=\omega_0/c$, ω_0 – резонансная частота отростка).

В экспериментах с одним отростком удалось наблюдать возбуждение первой моды в волноводе за отростком. Тщательное зондирование поперечного сечения волновода обнаружило превышение уровня звукового давления у стенок по сравнению с уровнем в центре волновода на 5–6 дБ. Спадание уровня звукового давления от стенок к центру было достаточно пологим.

В связи с тем что увеличение расчетной частоты звукоизоляции сдерживается поперечными размерами волновода, исследования были направлены на поиски путей расширения диапазона эффективности отростков.

На фиг. 4 показана звукоизоляция двух отростков одинаковой высоты (h=0,27 м), установленных на противоположных сторонах волновода. Эксперимент подтвердил теоретически предсказываемое расширение диапазона звукоизоляции такого отражателя. На этой же фигуре показана звукоизоляция отростков, расположенных перпендикулярно друг к другу. Эти данные свидетельствуют о некотором увеличении звукоизоляции

практически без заметного расширения полосы заглушения при таком расположении отростков.

Следующая серия экспериментов была связана с исследованием звукоизоляции нескольких отростков, расположенных так, как это показано на фиг. 5. Каждая комбинация расположения отростков и их размеров дает свою характеристику звукоизоляции, поэтому результаты этих экспериментов можно обобщить следующим образом.

1. Звукоизоляция двух или нескольких отростков, расположенных на одной стороне волновода, зависит от расстояния между ними. Если это расстояние превышает половину длины волны, звукоизоляция увеличивается без расширения частотного диапазона. При меньших расстояниях, вплоть до размещения отростков без зазора, наблюдается расширение полосы звукоизоляции практически без изменения ее величины.

2. Заметное расширение полосы звукоизоляции и ее величины наблюдается при применении отростков различной высоты.

3. Наибольшая эффективность применения отростков наблюдается при размещении их на различных сторонах канала и при различной их высоте.

Последнее хорошо иллюстрируется спектрограммами (фиг. 6), полученными при исследовании звукоизоляции четырех различных по высоте отростков, один из которых расположен перпендикулярно трем остальным. Одиночные отростки такой высоты дают незначительную звукоизоляцию, а такая их комбинация эффективна в достаточно широком диапазоне частот.

Полученные экспериментальные данные позволяют рекомендовать для практического использования отростков разбиение широких волноводов на более узкие и размещение на всех их стенках резонансных отростков различной высоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Лапин А. Д.* Звукоизоляция в волноводах. Акуст. ж., 1975, *21*, 3, 337–350.
2. Шумы, вызываемые нагревающим, вентилирующим и воздухокондиционирующим оборудованием. ISO, TK-43-SC, ДNA, Международная организация стандартизации, 1971.
3. *Шапиро Б. К.* Основы расчета глушителей шума выхлопа. М., Оборонгиз, 1943.
4. *Davis D. D., Stokes G. M., Moore D., Stevens G. L.* Theoretical and experimental investigation of mufflers with comments on engine-exhaust muffler design. NACA Rep., 1954, 1192.
5. *Лапин А. Д.* Дифракция звука на прямоугольных канавках в волноводе. Пром. аэродинамика, 1960, 18, 34–47.
6. *Lippert W. K. R.* Sound propagation inducts with side branches. Acustica, 1957, 7, 3, 137–145.

Ворошиловградский машиностроительный институт

Поступила
22 января 1979 г.
После исправления
15 июня 1979 г.