

ПОГЛОЩЕНИЕ ЗВУКА *

В. О. Кнудсен

Последние исследования по акустике существенно изменили наши представления о поглощении звука в помещениях, на открытом воздухе, а также в чистых и смешанных газах. До последних трех лет все теории о поглощении звука в помещениях были основаны на двух допущениях: 1) что звуковая энергия сохраняется после того как источник остановлен в лучах звуковой энергии, имеющих ту же частоту, что и начальный звук, произведенный в помещении, и что звуковая энергия полностью рассеивается в продолжение всего времени затухания и 2) что поглощение звука в среде (воздухе) незначительно и им можно пренебречь. Очевидно, однако, что простое прямоугольное помещение является ограниченным трехмерным пространством, способным совершать свободные колебания, частота f которых дается формулой:

$$f = \left(\frac{c}{2} \right) \left(\frac{h^2}{l_1^2} + \frac{p^2}{l_2^2} + \frac{q^2}{l_3^2} \right)^{1/2},$$

где c — скорость звука в воздухе, l_1, l_2, l_3 — размеры помещения и h, p и q — порядковые числа, имеющие значения 0, 1, 2, ... Автор показал, что эти характерные частоты очень резко выражены в небольших прямоугольных помещениях и что реверберация звука состоит из этих свободных колебаний. Вообще, за исключением очень низких частот, в затухании принимает участие ряд смежных свободных колебаний и вообще слушатель отождествляет замирающий звук со звуком той же частоты, как и сообщенный помещению. Однако, когда небольшое прямоугольное помещение возбуждается звуком частоты, отличающейся только на едва заметную величину от частоты одного из основных видов колебаний помещения, ухо может легко обнаружить, что затухающие колебания имеют частоту свободных колебаний помещения, а не наложенной (вынужденной) частоты. Очевидно, поэтому, что точная теория реверберации должна учитывать скорость заглушения свободных колебаний в помещении. Некоторая работа в данном направлении уже проделана Стрэттом¹ и Шустером и Вэцманном².

* Review of Scientific Instruments № 12, 4, 637—639, 1933; перевод Я. Копиловича.

Еще больше, однако, осталось сделать до нахождения точной формулы для практических расчетов поглощения звука в помещениях.

Допущение, что поглощением слышимого звука в воздухе можно пренебречь, больше не приемлемо. Все прежние теории реверберации были основаны на допущении, что все поглощение происходит у границ, т. е. что поглощением среды, ввиду ее незначительности, можно пренебречь, и многие исследователи делали аналогичное допущение при вычислении распространения слышимого звука через воздух. Согласно классическим теориям Стокса (Stokes), Кирхгофа (Kirchhoff) и Рэля (Rayleigh) о поглощении звука в газах, ослабление в среде было бы пренебрегаемо мало (по крайней мере для всех основных расчетов архитектурной акустики) для частот до 8000 герц. Эти ранние теории показали, что ослабление становится значительным при очень высоких частотах — постоянная ослабления (аттенюации) пропорциональна квадрату частоты, — но для частот ниже 8000 герц ослабление не столь велико, чтобы его следовало принимать во внимание при обычных вычислениях реверберации или во многих других проблемах звуковой сигнализации. Однако, как было показано последними экспериментами, это не соответствует действительности. Было показано, например, что поглощение слышимого звука в воздухе порядка 10—100 раз больше, чем предполагалось классической теорией, и что ослабление (аттенюация) характерным образом зависит от температуры и присутствия других газов, как например водяных паров, причем зависимость эту совсем нельзя было ожидать по классической теории³. Ослабление плоской звуковой волны представляется уравнением $I_x = I_0 e^{-mx}$, где I_0 — интенсивность звуковой волны в положении $x = 0$, I_x — интенсивность ее после того, как она прошла расстояние x , и m — постоянная ослабления, т. е. $\frac{1}{m}$ — расстояние, которое волна должна пройти для того, чтобы ее интенсивность уменьшилась до $\frac{1}{e}$ ее начальной интенсивности.

Измерения скорости затухания в двух опытных комнатах с одинаковыми граничащими материалами, но разными средними свободными путями, дают возможность определить эту постоянную ослабления m , так же как и коэффициент поверхностного поглощения ограничивающих поверхностей. Так, при 10 000 герц, $m = 0,00003 \text{ см}^{-1}$ для сухого воздуха при температуре 20°C ; при прибавлении к воздуху водяных паров значение m увеличивается до максимума в $0,00065 \text{ см}^{-1}$, при относительной влажности в 18% ; при дальнейшем увеличении влажности значение m снова уменьшается, падая до $0,00022 \text{ см}^{-1}$, при относительной влажности в 80% . При 6000 герц максимум поглощения имеет место при относительной влажности в 13% и значение m при этом максимуме равно $0,00039 \text{ см}^{-1}$, что представляет как раз 60% величины максимума при 10 000 герц. Аналогичные данные при этих и дру-

гих частотах показывают, что максимальное значение m при любой частоте пропорционально первой, а не второй степени частоты, как требует классическая теория. Для сравнения значения m данные классической теории были бы $0,000027 \text{ см}^{-1}$ для 10 000 герц и $0,000010 \text{ см}^{-1}$ для 6000 герц, и практически никакого изменения m не должно было бы быть при приведенных выше изменениях влажности и температуры.

Аналогичные измерения поглощения звука в кислороде и водяных парах показывают, что коэффициент m достигает максимального значения приблизительно в пять раз большего, чем для воздуха, но максимум наступает при более высокой концентрации водяных паров. Далее, поглощение в азоте не намного отличается от результатов, полученных согласно классической теории, и не изменяется от присутствия молекул воды. Эти результаты удовлетворительно объясняются Кнезером⁴ допущением, что при столкновениях между кислородом и известными другими молекулами, как например молекулами воды и весная часть поступательной энергии сталкивающихся молекул преобразуется в колебательную энергию кислородных частиц. Когда газ сжимается адиабатически, в продолжение фазы сжатия при звуковых колебаниях, происходит увеличение количества колеблющихся молекул, а при расширении газа происходит уменьшение количества колеблющихся молекул. Если сжатие и расширение происходит достаточно медленно, газ всегда будет оставаться в состоянии теплового равновесия, и преобразование поступательной энергии в колебательную в продолжение сжатия будет как раз равно преобразованию колебательной энергии в поступательную в течение расширения. Вообще, однако, необходимо конечное время (равное „средней жизни кванты колеблющейся молекулы“) для установления теплового равновесия между нормальными и возбужденными молекулами. Если цикл сжатия и расширения происходит в период времени, сравнимый с „средним временем жизни“, процесс больше не обратим и, следовательно, произойдет превращение звуковой энергии в теплоту. С другой стороны, если цикл звуковой волны происходит в интервал времени, очень короткий по сравнению с этим „средним временем жизни“, преобразуется только совсем незначительная часть энергии и, следовательно, звуковая энергия поглощаться не будет. Теория Кнезера основана на одной из ранних работ Эйнштейна⁵, которая показывает, что измерение рассеяния звука в частично диссоциированном газе должно представлять средство для определения скорости диссоциации этого газа. При применении к проблеме поглощения звука реакция происходит не между атомами и молекулами, как у Эйнштейна, но между нормальными и возбужденными молекулами кислорода, и водяные пары действуют как катализатор, оказывая очень большое влияние на „среднее время жизни“ колебательной кванты. Из этих теоретических соображений и известного значения колебательной энергии для

O_2 (4420 кал/моль) Кнезер может дать объяснение результатов экспериментов автора по поглощению звука в воздухе и кислороде.

Новые результаты, касающиеся поглощения звука в газах, имеют большое значение для проблем звуковой сигнализации в воздухе, архитектурной акустики и воспроизводства звуков как в закрытых помещениях, так и на открытом воздухе. Кроме того, эти новые результаты показывают, что поглощение звука должно быть объяснено в терминах квантовой, а не классической механики, и дают в руки исследователю новую технику изучения молекулярных реакций в газах. Возможно, что измерения поглощения звука в газах откроют еще значительно больше о молекулярной структуре и о молекулярных реакциях, чем это может быть обнаружено при помощи измерений скорости звука, которые уже давно применяются в связи с проблемами молекулярной физики газов. Поглощение является непосредственным и большим эффектом преобразования энергии при молекулярных столкновениях, в то время как рассеяние является косвенным и почти всегда неизмеримо малым эффектом. Результаты измерений поглощения в газах, которые показывают возможности этой новой техники исследования свойств молекул, будут скоро опубликованы.

ЛИТЕРАТУРА

1. M. I. O. Strutt, Zs. ang. Math Mech. **10**, 360, 1930
2. K. Schuster u. F. Waezmann, Ann. d. Phys. **1**, 671, 1929.
3. V. O. Knudsen, J. Acous. Soc. Am **5**, 112, 1933.
4. H. O. Kneser, J. Acous. Soc. Am. **5**, 112, 1933.
5. A. Einstein, Ber. d. Berl. Akad **5**, 380, 1920.