

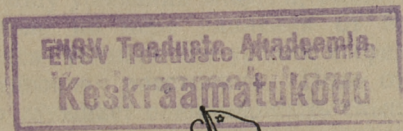
Er 6.7

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
Серия А № 74 1956

Х. А. ОРУВЕЭ

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ
АНАЛОГИИ ПРИ АКУСТИЧЕ-
СКОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ

P 26939



ЭСТОНСКОЕ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТАЛЛИН 1956

АННОТАЦИЯ

В настоящей работе определяются приближенные методы решения задач по архитектурной акустике, разработанные автором на основе исследований распределения звука в небольших зрительных залах как в натуре, так и на соответствующих моделях.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время основной задачей проектировщиков и строителей является всестороннее улучшение качества сооружений. Одной из важных отраслей архитектурного творчества является и акустическое проектирование. Однако вопросы акустики часто серьезно недооцениваются авторами проектов различных культурно-бытовых зданий, что приводит иногда к большим акустическим дефектам. Такой подход к архитектурной акустике вызван частично тем, что теория практически еще мало помогла архитектору заранее предвидеть результаты выбранного решения.

Самый сложный вопрос, который возникает в акустическом проектировании — это вопрос о том, как распределяется звук по различным местам для слушателей.

Одним из вспомогательных критериев, широко применяемых в архитектурной акустике, является время реверберации, которое принимается как постоянное по всему помещению. Однако следует признать, что в ряде случаев не наблюдается постоянства величины времени реверберации. Часто встречаются помещения, в которых акустическое поле получается недиффузным и неравномерным, т. е. пространственная реверберация и уровень громкости заметно меняются в зависимости от расположения наблюдателя от источника звука. При этом прямой звук, согласно закону убывания энергии, создает весьма неравномерное поле по мере удаления от источника, причем наблюдается уменьшение уровня в среднем на 6 дБ при каждом удвоении расстояния. Поле отраженного звука несколько улучшает равномерность слышимости в различных точках, но оно также не является постоянным по всему помещению. Значительные неравномерности звукового поля сильно ухудшают восприятие звука, в частности, при достаточно высоком уровне мешающего звука, т. е. собственного шума в помещении.

Несмотря на большое значение пространственной

равномерности распределения звука, мы до сих пор имеем мало данных в этой области. Теоретически эта задача является чрезвычайно сложной и допускает лишь приближенные математические решения. Большую помощь оказывают практические исследования в помещениях и на их моделях.

Сопоставляя соответствующие результаты натуральных исследований двух масштабов, мы можем установить, с одной стороны, правила аналогии и, с другой стороны, оптимальные для акустики параметры и форму элементов интерьера.

Настоящая работа ограничивается главным образом решением первой задачи. Другая часть экспериментальных исследований представляет наибольший интерес, но нуждается еще в дальнейшей проверке на практике.

Большая часть экспериментального материала, использованного в работе для основных выводов, составляет содержание кандидатской диссертации автора, выполненной в натуре и в лаборатории строительной физики ЛИСИ.

1. ПРИБЛИЖЕННЫЙ МЕТОД ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ПОМЕЩЕНИЯ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЗВУКА

Этот метод основан на том предположении геометрической акустики, что интенсивность уровня звука в любой точке помещения определяется наличием прямых и отраженных звуковых «лучей».

Как известно, геометрический метод отражения звука может быть применен в тех случаях, когда средняя длина пути звуковой волны в помещении достаточно велика, т. е. когда количество отражений в секунду мало и анализ звукового поля сводится к изучению лишь первых или нескольких отражений.

Действительно, практика последних исследований подтверждает, что эффективное звуковое поле, уравнивающее неравномерности распределения звука в помещении, обусловлено именно отраженной энергией и состоит из сумм нескольких первых отражений. Энергия позднейших отражений слишком рассеяна, и уже поэтому будет мала и не окажет существенного влияния на уровень интенсивности звука [1; 2; 3; 4; 5].

Второе условие, допускаемое геометрической акустикой, заключается в предположении, что в помещении в течение всего процесса реверберации существуют лишь относящиеся к источнику звука звуковые частоты. Расхождения между геометрическим и физическим методами имеют место в диапазоне низких частот, где количество собственных частот помещения невелико, что приводит к увеличению громкости отдельных частот. Равномерность распределения собственных частот увеличивается при высоких частотах и с увеличением размеров помещения. Таким образом, второе допущение геометрической акустики становится идентичным первому условию, чтобы объем был достаточно велик по сравнению с длиной волны, или, иначе, чтобы $l \ll d_{min}$, где d_{min} — минимальный размер помещения (см. также [6]).

При составлении эскизного проекта основная задача заключается в решении удачной формы и пропорций зала. В этих целях достаточно учитывать прямой звук и однократные отражения его.

Для приближенного анализа звукового поля мы исходим из нижеследующих соображений.

В заполненном зрительном зале «поверхность слушателей»¹, имеющая большой коэффициент звукопоглощения, не отражает звука, получившего отражения от потолка и стен. Отсюда следует, что доминирующей однократно отражающей поверхностью является потолок. Основными причинами несходной плотности отраженной от потолка энергии служат:

- 1) различие уклонов убывания и отражения звуковых «лучей» от разных точек нижней поверхности потолка, т. е. в зависимости от высоты его над источником звука, и
- 2) различная активность отражающей поверхности, в зависимости от углов отражения, имеющая влияние на коэффициент поглощения.

Равномерность распределения отраженного звука от поверхностей стен также является функцией длины «луча» и формы этих поверхностей, и зависит также от равномерности распределения звукопоглощающих элементов в интерьере.

На основе последних исследований [3] можно считать, что уровень отражений, сопровождающих прямой звук, и

¹ Условно принимается поверхность, соединяющая все точки восприятия звука на высоте 1,15 м от поверхности пола.

уровень прямого звука суммируются, как одновременно достигающие точки восприятия в том случае, если разница в длинах отраженного и прямого «лучей» не превышает 20 м.

Обозначим: E — акустическая мощность источника; r_1 и d_1 — соответственно длина прямого и отраженного луча до слушателя;

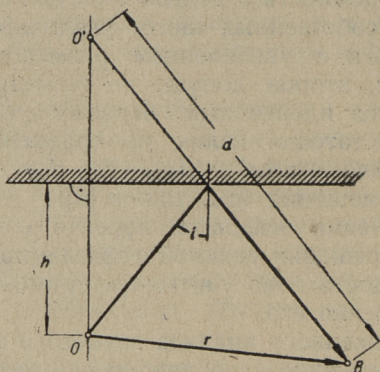


Рис. 1. Схема геометрического отражения.

β — средний коэффициент отражения поверхностей (рис. 1). Тогда давление звука в первом ряду слушателей будет

$$e_1 = \frac{E}{r_1} + \frac{E \cdot \beta}{d_1},$$

а в самом удаленном ряду от источника

$$e_n = \frac{E}{r_n} + \frac{E \cdot \beta}{d_n}.$$

Тогда
$$\frac{e_1}{e_n} = \frac{\frac{1}{r_1} + \frac{\beta}{d_1}}{\frac{1}{r_n} + \frac{\beta}{d_n}};$$

переходя к децибелам:

$$10 \log \frac{I_1}{I_n} = 20 \log \frac{e_1}{e_n} = 20 \log \frac{r_1}{r_n}.$$

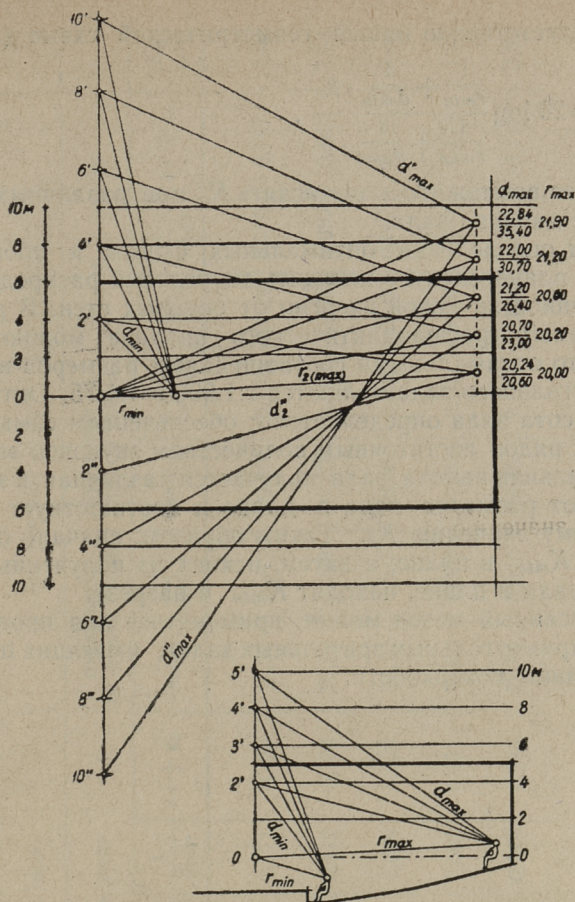


Рис. 2. Применение графоаналитического метода для определения оптимальных размеров помещения.

Обозначив показатель неравномерности распределения уровня звука относительно передних и самых удаленных рядов K_0 (в децибелах):

$$K_0 = 20 \log \frac{(e_n + e_0)_{max}}{(e_n + e_0)_{min}}, \quad (1)$$

где e_n — давление прямого звука; e_0 — давление отраженного звука, измеренные в соответствующих зрительных рядах.

Соответственно нашей геометрической схеме (рис. 1)

$$K_0 = 20 \log \frac{\frac{1}{r_{min}} + \frac{1}{d_{min}} \cdot \beta}{\frac{1}{r_{max}} + \frac{1}{d_{max}} \cdot \beta}, \quad (2)$$

что дает возможность вычислять K_0 при различных параметрах данного зала.

Для определения оптимальных формы и пропорции зала в плане следует исходить из условий распределения отраженной звуковой энергии от боковых стен. В результате такого графоаналитического анализа можно доказать, что оптимальными соотношениями размеров в плане прямоугольного зала являются 1:1,50 до 1:1,75. Оптимальная высота зала определяется с обеспечением самых удаленных рядов достаточным количеством звуковой энергии. Оптимальная высота зала получается различная в зависимости от размеров зала в плане и соответствует минимальному значению K_0 . Таким образом, вначале определяется K_{min} в плане, а затем, исходя из полученных размеров зала в плане, находят K_{min} в разрезе.

Описанный метод может применяться для проектирования прямоугольных зрительных залов, имеющих плоские внутренние поверхности.

Примеры

1. Расчет для определения оптимальной ширины зала при заданной длине в 21 м
Таблица 1

Расстояние от боковой стены до источника	$(e_n + e_0)_{max}$				$(e_n + e_0)_{min} = \frac{1}{(d_1 + d_2)_{max}} + \frac{1}{r_{max}}$				K_0 [46]			
	в первом ряду				отражение от правой стены		e_n			$e_n + e_0$		
	$Q = \frac{d_{min}}{r_{min}}$	$\frac{1}{r_{min}}$	$\frac{1}{d_{min}}$	$e_n + e_0$	$d_{max(1)}$	$\frac{1}{d_{max(1)}}$	$d_{max(2)}$	$\frac{1}{d_{max(2)}}$			$\frac{1}{r_{max}}$	
2	$\frac{5,66}{4,0}$	0,25	0,177	0,426	20,24	0,049	20,60	0,048	20,00	0,098	0,147	2,90
4	$\frac{8,94}{4,0}$	.	0,112	0,362	20,70	0,048	23,00	0,043	20,20	0,092	0,140	2,58
<u>6</u>	$\frac{12,65}{4,0}$	.	0,079	0,329	21,20	0,047	26,40	0,038	20,60	0,087	0,133	<u>2,47</u>
8	$\frac{16,49}{4,0}$	.	0,061	0,311	22,00	0,046	30,70	0,032	21,20	0,081	0,124	2,51
10	$\frac{20,40}{4,0}$	.	0,049	0,299	22,84	0,044	35,40	0,028	21,90	0,077	0,117	2,53

Оптимальная ширина зала $2 \cdot 6 = 12$ м

$12 \text{ м} : 21 \text{ м} = 1 : 1,75$

2. Расчет для определения оптимальной высоты зала (размеры в плане 8 на 13)

Таблица 2

Высота (h) потолка над источником (общая высо- та зала $H=h+2,5$ м)	$(e_n + e_0)_{max}$				$(e_n + e_0)_{min}$				K_0 [до]	
	в первом ряду		в последнем ряду		в первом ряду		в последнем ряду			
	$Q = \frac{d_{min}}{r_{min}}$	$\frac{1}{r_{min}}$	$\frac{1}{d_{min}}$	$e_n + e_0$	$Q = \frac{d_{max}}{r_{max}}$	$\frac{1}{r_{max}}$	$\frac{1}{d_{max}}$	$e_n + e_0$		
2	$\frac{6,8}{4,0}$	0,25	0,147	0,397	$\frac{11,0}{10,0}$	0,10	0,091	0,191	2,08	6,36
3	$\frac{8,4}{4,0}$	"	0,119	0,369	$\frac{12,0}{10,0}$	"	0,083	0,183	2,02	6,11
4	$\frac{10,2}{4,0}$	"	0,098	0,348	$\frac{13,2}{10,0}$	"	0,076	0,176	1,98	5,93
<u>5</u>	$\frac{12,2}{4,0}$	"	0,082	0,332	$\frac{14,8}{10,0}$	"	0,068	0,168	1,97	<u>5,89</u>
6	$\frac{14,0}{4,0}$	"	0,075	0,325	$\frac{16,2}{10,0}$	"	0,062	0,162	1,98	5,93
8	$\frac{18,0}{4,0}$	"	0,055	0,305	$\frac{19,5}{10,0}$	"	0,051	0,151	2,02	6,11
10	$\frac{22,0}{4,0}$	"	0,045	0,295	$\frac{23,0}{10,0}$	"	0,043	0,143	2,65	8,45

Общая оптимальная высота зала $5 + 2,5 = 7,5$ м

2. МЕТОД АНАЛОГИИ ЗВУКА И СВЕТА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ НА НЕБОЛЬШОЙ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ

Для акустических исследований применяются несколько методов двухмерного и трехмерного моделирования. Существенным недостатком всех этих методов следует считать ограниченность представления о распределении уровней звука по местам слушателей, так как они дают возможность изучать лишь отражения отдельных звуковых волн.

Нами представляется фото-метод, имитирующий установившееся звуковое поле на модели. При помощи фотограмм или электрических измерений возможно судить о преимуществах или недостатках той или другой формы зала и ввести коррективы в абсолютные размеры зала.

По принципу этот метод также основан на геометрических законах отражения звука и с большой точностью применим для залов среднего и большого объема, когда $\lambda_{cp} \ll d_{min}$.

На небольшой объемной модели источник звука заменяется источником точечного света в виде миниатюрной электрической лампочки. Внутренние поверхности модели делаются оптически отражающими. При этом учитывается, что звук отражается от поверхностей помещения не как свет от правильных зеркал, но как от рассеянно-отражающих поверхностей. Такая аналогия действительно наблюдается между явлениями звука и света, так как звук поддается дифракции и рассеянию как вследствие геометрических размеров помещения, так и под влиянием характера поверхностей внутренних стен.

В модели таким материалом, изображающим внутреннюю штукатурку со средней шероховатостью, является наклеенный на фанеру станиоль. Публика в зале имитируется матовым стеклом. Последнее, с одной стороны, имеет соответствующий коэффициент отражения, а, с другой стороны, дает возможность наблюдать на нем достаточно полную картину распределения яркости, изображающую распределение звуковой энергии по «поверхности» слушателей. Для этой цели модель должна быть открытой с нижней стороны, а вся установка помещается в темной комнате.

Корпус модели должен быть построен с двойными стенками для того, чтобы в одной и той же коробке воз-

можно было компоновать разные по пропорциям и форме «помещения». Для внутренних поверхностей целесообразно использовать ряд вырезок из фанеры различных размеров, переустановка которых должна быть по возможности простой.

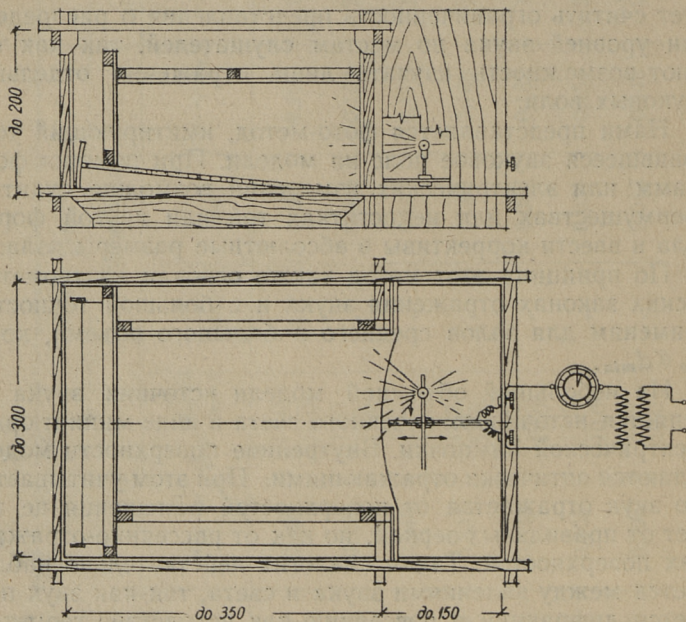


Рис. 3. Конструкция опытной модели (размеры в мм).

Исследование акустических свойств помещения может осуществляться двумя путями: 1) при помощи гальванометра у фотоэлемента, расположенных в разных точках матового стекла. В этом случае показатель неравномерности K_0 выражается следующим образом:

$$K_0 = 20 \log \frac{I_{max}}{I_{min}}, \quad (3)$$

где I_{max} и I_{min} силы тока в соответствующих точках;

2) при помощи фотограмм — с негативным изображением состояния яркости матового стекла. Под матовое стекло помещается фотобумага. В течение короткого промежутка времени автоматически включается источник

света. Негатив проявляется при заданном режиме. Степень почернения фотобумаги соответствует действительному состоянию звука на «поверхности» слушателей при нескольких (полезных) отражениях звуковых волн, имеющих большое значение в зрительных залах.

Определение коэффициента K'_0 на фотограмме может осуществляться фотометрическим путем и наглаз. Показатель неравномерности K'_0 соответствует разнице тональной шкалы фотограммы:

$$K'_0[\text{дб}] = B_{\max} - B_{\min}.$$

В результате проверки модельных испытаний в натуре обнаружено, что K'_0 (освещенности), определенный на модели при помощи фотоэлементов, хорошо совпадает с K_0 в помещении при высоких частотах, начиная с 5000 гц. Для получения K'_0 при распределении средних и низких частот целесообразно использовать фото-метод с различной контрастностью фотоматериалов. Ввиду того, что распределение уровня звука в одном и том же помещении при средних и низких частотах менее равномерно, чем при высоких, то для этих случаев обосновано будет применение фотоматериалов с повышенной контрастностью.

Для исследования распределения различных частот можно применять следующую по контрастности отечественную фотобумагу:

Таблица 3

Частота	№ бумаги	Относительный коэффициент контрастности фотобумаги	Коэф. частотн. характеристики распределения звука	Оптимальная выдержка в сек. для модели в масштабе 1 : 100
100—200	7	1,6	1,5	2,0
300—400	6	1,3	1,1	
500—2000	5	1,0	1,0	1,0
2000—6000	4	0,81	0,8	
6000—8000	3	0,67	0,7	0,5
свыше 8000	2	0,52	0,4	

Для оценки чернобелого поля фотографии на глаз необходимо составлять ступенчатый оптический клин, который состоял бы из 20-и тональных ступеней-светлостей с одинаковым интервалом. В этом случае оптический клин практически соответствует общей шкале распределения уровня интенсивности звука в зале прямо в децибелах. Шкалу яркостей можно изготовлять также из фотобумаги, причем B_{min} соответствует белому тону и B_{max} черному тону, а каждая следующая ступень получается прибавлением выдержки относительно предыдущего в два раза.

Полученные хорошие совпадения измерений в помещениях различной формы и размеров и на соответствующих моделях позволяют считать, что предлагаемый метод может применяться при проектировании новых залов и при реконструкции старых.

В отличие от других методов моделирования, применявшихся при изучении отдельных звуковых отражений на двухмерных моделях, метод аналогии на трехмерной модели больше всего соответствует задачам архитектора при выборе объема, формы и внутренней отделки зрительных залов.

3. ПРИМЕР ОПРЕДЕЛЕНИЯ K_0 В ПОМЕЩЕНИИ

Во всех общих случаях большое значение для хороших акустических условий имеет достижение необходимого уровня интенсивности звука на различных местах слушателей и отношение этого уровня к уровню мешающего звука, т. е. постороннего шума.

Необходимый уровень громкости для любого слушателя определяется необходимой равномерностью распределения звуковой энергии по «поверхности» слушателей с учетом уровня собственного шума в помещении.

Такая зависимость необходимого K_0 от уровня шума и процента артикуляции дана на рис. 4.

Например, минимальный уровень типичного шума в небольшом зрительном зале — 35 дБ. Этот уровень на сегодняшний день является практическим пределом. Если допускать уровень шума, проникаемого извне сквозь стены и окна, в пределах 25 дБ, то общий уровень шума в зале будет 35,4 дБ. Для обеспечения хорошей слышимости в задних зрительных рядах (это требует $\geq 75\%$ артику-

ляции) коэффициент K_0 должен быть ≤ 1 дБ. Очевидно, что такое равномерное распределение естественного звука в зале невозможно.

Если допускать в конце зала снижение артикуляции до 60% (что считается удовлетворительным), то для этого случая $K_0 \leq 18$ дБ. Однако это допустимо только при

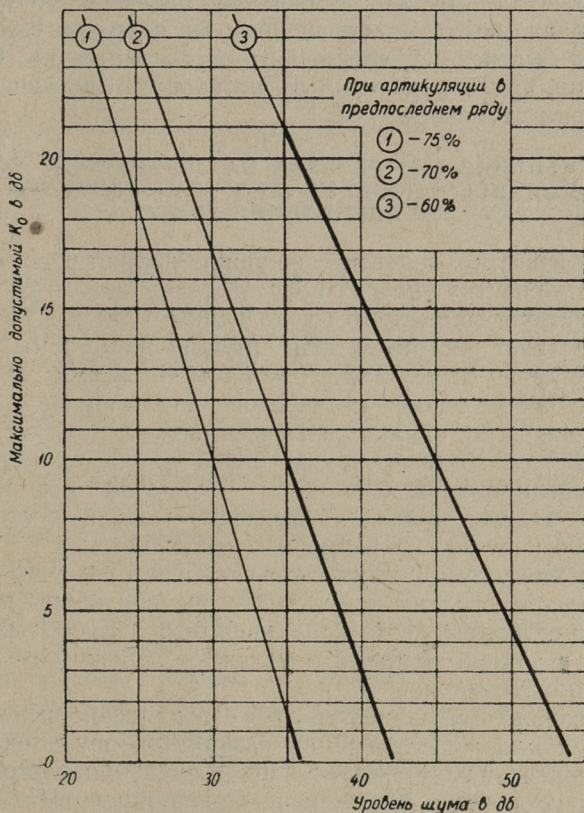


Рис. 4. Максимально допустимый показатель K_0 при уровне громкости речи в 60 дБ в передних рядах.

минимальном уровне шума (~ 35 дБ). Если общий уровень будет порядка 45 дБ, что является более реальным, то $K_0 \leq 10$ дБ. Это обстоятельство подчеркивает необходимость обращать при проектировании чрезвычайное вни-

вание на равномерное распределение звука в помещениях, рассчитанных на естественные источники звука. Что касается, например, кинозала, то здесь динамики более равномерно распределяют звук по объему помещения, а сила звука поддается регулированию.

Измерения в пустом и заполненном помещениях показывают, что в пустом помещении распределение звука более равномерно. В заполненном же зале уровень звука спадает быстрее с удалением от источника звука. Следовательно, при определении K_0 необходимо применять заполненное помещение.

4. ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗВУКА

Как известно, человеческие уши обладают чувствительностью к спектру упругих волн от длины волн в 20 м, что соответствует частоте 16 гц, до длины волн в 2,1 см, что соответствует частоте 16 кгц. Музыкальные тоны имеют частоту от 40 гц до 15 кгц ($\lambda = 8,5 \text{ м} - 2,3 \text{ см}$).

При применении оптической аналогии на моделях длина волны источника света находится в порядке $4 \cdot 10^{-5}$ до $7 \cdot 10^{-5}$ см. В этом случае длина волны, применяемой при моделировании, в 50 тыс. — 50 милл. раз меньше длины волны звука, а размеры модели — лишь в 100—200 раз меньше размеров помещения.

В общем случае оптическая аналогия применима лишь тогда, когда средняя длина пути звуковой волны гораздо больше ее длины, а размеры препятствий велики по сравнению с длиной волны, что является условием геометрического отражения.

В случае нарушения простого отражения весьма полезными для моделирования слышимого звука оказываются ультразвуковые волны. При применении ультразвука можно уменьшить длину волны пропорционально уменьшению размеров помещения. Например, если модель построена в масштабе 1 : 50, то ультразвук с частотой 25 кгц имитирует звук в 500 гц.

Важное значение имеют при моделировании размеры ультразвукового излучателя. Его характеристика направленности должна быть близкой к характеристике источника звука в помещении, хотя это не всегда представляет простую задачу.

Третье условие, важное для применения метода аналогии, заключается в том, чтобы внутренние поверхности модели имели соответствующие коэффициенты отражения. Поэтому стены изготавливаются из фанеры или гипса.

Для изучения распределения ультразвука по «поверхности» слушателей измерения уровня производятся при установившемся режиме¹ при помощи миниатюрного микрофона, усилителя и миллиамперметра. Важно, чтобы приемник ультразвука был наименьшим и не помешал бы отражению волн в модели.

Для исключения влияния неоднородности ультразвука поля излучаемым источником, его интенсивность предварительно измеряется вне модели в нескольких точках плоскости, перпендикулярной к главной оси распространения волн.

Благодаря достаточно полной аналогии, на модели возможно исследовать такие явления, как, например, рассеяние звука из-за неравномерного распределения звукопоглотителей в помещении и дифракция в стеновых материалах.

Метод наблюдения на модели многократно отраженных импульсов может быть с помощью осциллографа использован для выяснения неоднородности распределения звукопоглотителей или для распознавания излишней регулярности отражающей поверхности. Если на модели имеются неоднородности или сильно отражающие поверхности, то картина импульсов в осциллографе будет неправильной и величина их будет меняться скачкообразно и с резким затуханием.

При расчете частоты ультразвука, используемого при моделировании, исходными точками должны являться свойства естественных источников звука, которые, как правило, обладают широким спектром звуковых частот. Учитывая практический диапазон речи и музыки (100—5000 (8000) гц) составлена сравнительная таблица для звуковых и ультразвуковых частот, используемых на моделях (таблица 4).

Как видно из таблицы, исследование распределения низких и средних частот оказывается возможным даже

¹ Когда в данной точке модели амплитуда силы звука остаётся постоянной по времени.

Масштаб моделирования	Частоты в килогерцах							
	1 : 25	2,5	6,25	12,5	25	50	100	200
1 : 50	5	12,5	25	50	100	200	400	
1 : 100	10	25	50	100	200	400	800	
1 : 200	20	50	100	200	400	800	1600	
Частоты речи и музыки	100	250	500	1000	2000	4000	8000	

при помощи высокочастотного слышимого звука, если применять модель более крупного масштаба (1:50—1:25).

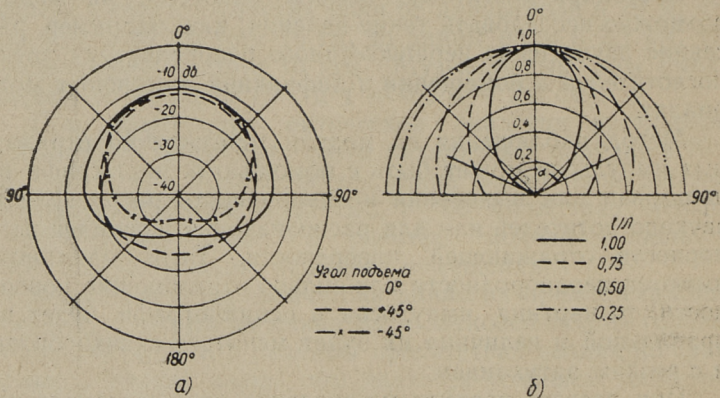


Рис. 5. а. Характеристика распределения уровня громкости речи вокруг головы. б. Зависимость характеристики направленности линейного излучателя (приемника) (R_0) от отношения линейного размера его (l) к длине излучаемой волны (λ).

Динамик, применяемый для этой цели, должен иметь характеристику направленности (в угловых величинах) не менее 120° , чтобы излучение было по возможности равномерным (рис. 5).

В связи с тем, что с повышением частоты направленность (телесный угол) динамика становится более острой, необходимо применять динамики «точечного» характера,

например, миниатюрный конденсаторный микрофон, который способен работать при широком диапазоне частот (до 100 кгц) [7]. Характеристика направленности этого прибора сравнима с характеристикой человеческого голоса. В случае динамика с более острой характеристикой возможно применение специального отражателя в виде металлического полушара.

Для изображения более высоких частот требуется ультразвуковой генератор (излучатель и ламповый генератор).

Ввиду относительной простоты и удовлетворения вышеуказанных условий можно применять магнестрикционный генератор. Максимальная интенсивность такого генератора получается при резонансе собственных частот стержня (трубки) излучателя. Поэтому вибратор ультразвука возбуждается ламповым генератором электромагнитных колебаний, частота которого устанавливается соответствующей собственной частоте колебаний вибратора.

При расчете длины волны ультразвука ориентировочно исходят из длин стержня l [8]

$$\text{Для никеля } f = \frac{2,5 \cdot 10^5}{l} \text{ гц.} \quad (5)$$

Так, например, частоте в 100 кгц соответствует стержень из никеля длиной около 2,5 см; а частоте 25 кгц — в 9,8 см.

Для использования на модели требуются 2—3 стержня и ламповый генератор, работающий в широком диапазоне частот. Настройка генератора производится переключением целого ряда конденсаторов. Для получения интенсивных ультразвуков применяют генераторы для возбуждения излучателя мощностью в 250—500 вт.

Для увеличения амплитуды ультразвуковой волны, а также для получения однородной характеристики излучателя, целесообразно заменять стержень трубкой и закреплять к одному концу трубки специальный отражатель в виде полушара.

Недостатком магнестрикционного вибратора является его большой температурный коэффициент, т. е. при работе излучатель значительно нагревается, что приводит к уменьшению амплитуды излучения. Для сохранения постоянного режима требуется охлаждение. Поэтому применение ультразвукового излучателя оказывается более надежным в жидкости.

Магнитострикционный вибратор возбуждается не только при основных собственных частотах, но и при т. н. высших гармониках, хотя возникшие при этом колебания будут менее мощными. Это обстоятельство дает возможность строить генератор, дающий колебания желаемой частоты.

Приемником ультразвуковых волн на уровне имитируемых слушателей служит высокочастотный микрофон, представляющий кварцевую пластинку с низкими собственными частотами.

Ввиду малости пьезомодуля кварца, необходимо применять радиоусилитель, работающий на соответствующих частотах и снабженный миллиамперметром. Лучшие результаты дают пьезоэлектрические микрофоны с кристаллом сегнетовой соли.

Показатель неравномерности распределения звука K_0 рассчитывается из уравнения (3).

5. ФОТОГРАФИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА НА МОДЕЛИ

а) Метод темного поля

До сих пор разработано несколько методов фотографирования ультразвука, из которых наибольшее распространение получил теневой метод или метод т. н. темного поля. Фотографирование теневым методом широко использовался в целях изучения отдельных отражений, дифракций, рассеяния, интерференции для измерения длины волн, а тем самым и скорости распространения ультразвука. Мало изучены возможности фотографирования звукового поля в установившемся состоянии, т. е. в условиях распределения звука по «поверхности» слушателей.

Несмотря на интерес, который представляют показатели зависимости уровня звука от положения точки восприятия, до сих пор получено мало таких данных и в помещениях и на моделях. Поэтому для дальнейшего выяснения конкретной природы объемного распределения звука необходимо интенсивное накопление нового экспериментального материала.

Идея теневого метода фотографирования распределения ультразвука по «поверхности слушателей» заклю-

чается в следующем. Ультразвук вызывает значительные изменения плотности (поперемьнные сжатия и разрежения) воздуха, которые приводят к изменению оптических свойств — коэффициента преломления. Если на пути распространения концентрированного из точечного источника света создать ультразвуковое поле в воздухе или в жидкости, то лучи света несколько изменяют свое направление. Пропуская при помощи специального устройства только отклоненные лучи и не пропуская лучей неотклоненных, мы получим изображение звукового поля, которое можно фотографировать.

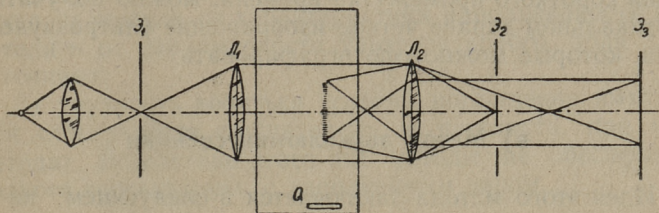


Рис. 6. Одна из схем установки для фотографирования распределения ультразвука на модели.

Модель помещения должна быть построена с прозрачным потолком и полом, чтобы создать возможность просвечивания. Модель располагается между двумя линзами, из которых верхняя дает параллельный пучок лучей, а нижняя фокусирует эти лучи на специальный экран, пропускающий только отклоненные лучи (рис. 6). Последние, изображая волнистые поверхности на уровне «поверхности слушателей», фотографируются на экране (\mathcal{E}_3). При такой схеме получается картина распределения звуковых волн в пустом зале, учитывающая различную плотность и интенсивность волнистых «следов» на пластинке.

Рассмотрение таких картин распределения ультразвука показывает, что по мере удаления от источника уменьшается контраст между отдельными частями ультразвуковых волн, а это соответствует уменьшению уровня звука к задним рядам.

б) Метод оптического отражения ультразвуковых волн от верхней поверхности жидкости

В данном случае модель зала представляет собой ванну, наполненную, например, глицерином или вазелиновым маслом. Ультразвуковой излучатель помещается непосредственно в жидкости. Модель перевернута — потолок помещения оказывается дном ванны. С верхней стороны модель оставляется открытой и когда ультразвуковые волны достигают поверхности жидкости, они вызывают появление на ней ряби. Осветив эту поверхность косо падающим параллельным пучком света в течение очень короткого промежутка времени, можно получать на вертикальном экране четкое изображение ультразвуковых волн, которые можно сфотографировать.

в) Метод звуколюминесценции

Идея этого метода заключается в следующем: на дне модели устанавливается кюветка, наполненная дистиллированной водой и снабженная фотопластинкой. При излучении ультразвукового источника можно получать фотографии без дополнительного освещения. Источником свечения фотоэмульсии являются электрические разряды, возникающие под действием ультразвука в кавитационных пузырьках (частицы газов и паров) жидкости. Кавитация возникает в воде, находящейся под атмосферным давлением при интенсивности ультразвука около $0,5 \text{ вт/см}^2$ [9].

Характерно для звуколюминесценции, что при первом прозвучивании воды наблюдается постепенное, медленное развитие свечения, и мгновенное возникновение свечения при повторных прозвучиваниях [10].

Степень почернения фотоэмульсии зависит от количества воды, напряжения на электродах и имеет максимум при настройке резонанса излучателя ультразвука. Кроме того, действие ультразвука зависит от расположения излучателя относительно поверхности фотопластинки. Интенсивность свечения может быть активизирована добавлением NaCl .

Для проведения ряда опытов на моделях различных параметров необходимо сохранять постоянный режим.

Так как при повышении температуры воды степень свечения уменьшается, а при действии ультразвука вода нагревается, то для сохранения постоянной температуры требуется охлаждение.

Описанный метод имеет много общего с фотометодом распределения на модели света, рассмотренным нами во 2-й главе, результаты измерений которого аналогичны с данным.

Несмотря на достоинства метода ультразвука для простого моделирования, таковой все же имеет некоторые существенные недостатки, а именно:

- 1) сложность аппаратуры;
- 2) зависимость равномерности распределения ультразвука на модели от характеристики направленности излучателя и от равномерности ультразвукового поля около источника;
- 3) трудность добиться условий поглощения имитируемой «поверхности слушателей», в частности, при фотометодах. Вследствие этого эти методы не обеспечивают полного соответствия с заполненным залом.

6. ИТОГИ ИССЛЕДОВАНИЙ

За последнее время все больше и больше распространялись мнения, что время реверберации, а также форма кривой реверберации не являются единственными объективными критериями акустических свойств помещения [1, 3, 7].

Одно нормирование времени реверберации не дает возможности учитывать ни величины звукового потока, падающего на «поверхность» слушателей, ни однородности распределения звуковой энергии по этой «поверхности», так как время реверберации берется одинаковое по всему помещению.

Из этого вытекает, что нормы оптимального времени реверберации можно применять лишь в отдельных случаях, а именно 1) когда звуковая энергия не связывается с площадью для зрительных мест (напр. радиостудия). 2) когда мощность источника поддается регулированию (напр. кинотеатр) и 3) при экспоненциальности кривой затухания, т. е. при равномерности распределения звукопоглотителей. В других случаях преобладающее значение

для хороших акустических условий имеет достижение необходимого уровня громкости на различных местах слушателей и отношение этой громкости к уровню постороннего шума. Уровень громкости в каждой точке «поверхности» слушателей определяется равномерностью распределения звуковой энергии источника.

ВЫВОДЫ

1. За основу акустического проектирования залов, рассчитанных на естественные источники звука, предлагается коэффициент неравномерности — K_0 (т. е. разница в децибелах между уровнями звука в наиболее и в наименее благоприятных точках помещения) или коэффициент равномерности — K_p .

2. Простейшим способом для определения K_0 при проектном задании является предлагаемый графоаналитический метод. В стадии технического проекта необходим метод моделирования.

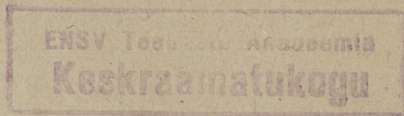
3. Простейшим и достаточно точным для проектировщика является метод оптической аналогии распределения звука, применяемый на трехмерной модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Thiele. Richtungsverteilung und Zeitfolge der Schallrückwürfe in Räumen. Akustische Beihefte («Acustica»), 2, 1953.
2. Ф. Р. Ватсон. Архитектурная акустика. Гос. Изд. И. Л. 1948.
3. P. H. Parkin. W. A. Allen. H. Purkis. W. L. Scholes. Acoustics of the Royal Festival Hall. «Acustica» v. 3, 1, 1953.
4. J. P. Maxfield. C. C. Potwin. Planning Functionally for good Acoustics. JASA, v. 12, 4, 1940.
5. M. Rettinger. Applied Architectural Acoustics. Brooklyn, 1947.
6. Л. Бреховских. Пределы применимости некоторых приближенных методов, употребляемых в архитектурной акустике. У. Ф. Н. № 32, 4, 1947.
7. Л. Беранек. Акустические измерения. И. Л. 1952.
8. Кэрлин. Ультразвук. И. Л. 1950.
9. Б. Б. Кудрявцев. Применение ультраакустических методов в практике физико-химических исследований. Гос. изд. тех. теор. лит. 1952.
10. В. Л. Левшин, С. Н. Ржевкин. К вопросу о механизме свечения жидкостей при воздействии ультразвука. ДАН, № 16, 8. 1931.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Введение	3
1. Приближенный метод для определения оптимальных размеров прямоугольного помещения, предназначенного для естественных источников звука	4
2. Метод аналогии звука и света для применения на небольшой трехмерной модели	11
3. Пример определения K_0 в помещении	14
4. Применение ультразвука на трехмерной модели для исследования пространственного распределения звука	16
5. Фотографирование распределения ультразвука на модели	20
6. Итоги исследований	23
Выводы	24
Литература	25



Х. А. Орувез
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ АНАЛОГИИ ПРИ
АКУСТИЧЕСКОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ

Эстонское Государственное Издательство
Таллин, Пярну маантээ, 10

Редактор Л. Юргенсон
Технический редактор Л. Ууспылд
Корректор Э. Фельдманн

Сдано в набор 12 VI 1956. Подписано к печати 1 IX 1956. Бумага $54 \times 84,1/16$. Печатных листов 1,75. По формату 60×92 печатных листов 1,43. Учетно-издательских листов 1. Тираж 800. МВ-072'2. Заказ 2181. Типография «Тарту Коммунист», Тарту, Юликооли 17/19.

Цена 70 коп.

