АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XVI 1970 Вып. 3

УДК 534.842

ПОГЛОЩЕНИЕ ЗВУКА ПУБЛИКОЙ
(методы и результаты исследований).

ОБЗОР

В. В. Фурдуев

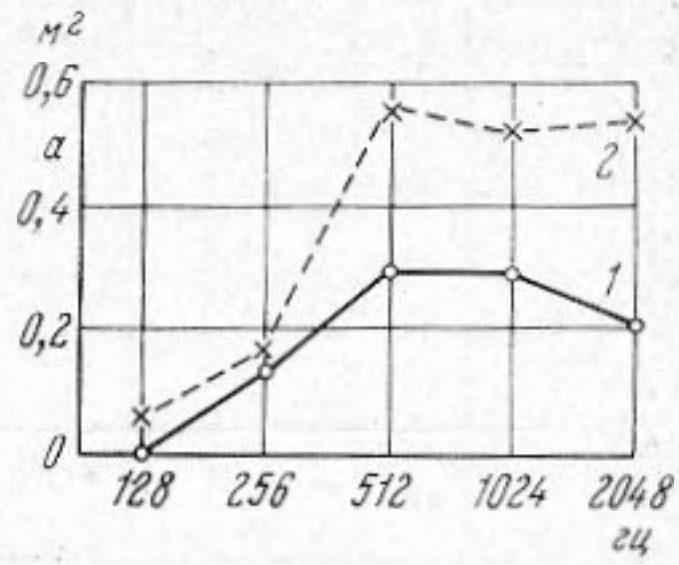
Хорошо известно, что условия слухового восприятия речи и музыки в залах общественного назначения сильно зависят от степени заполнения слушательских мест. Отвлекаясь от шумовых помех, можно сказать, что эта зависимость обусловлена двумя факторами. Во-первых, занимаемая публикой площадь является эффективным поглотителем звуковой энергии; это приводит к уменьшению времени реверберации при заполнении зала. Во-вторых, прямой звук, уровень которого оказывает значительное влияние на качество слухового восприятия, распространяясь над сильно поглощающей поверхностью, может ослабляться быстрее, чем это следует из закона обратных квадратов. Такое ослабление имеет место и для волн, отраженных от боковых стен зала. Влияние первого из двух перечисленных факторов заметно настолько отчетливо, что попытка его количественной оценки была предпринята уже на первом этапе развития архитектурной акустики. Второй фактор привлек к себе внимание исследователей значительно позже. Однако только сравнительно недавно недостоверность или противоречивость имеющихся экспериментальных данных побудили вернуться к исследованию обоих видов вносимого публикой поглощения с использованием эффективных приемов современной техники акустических измерений. Ниже дается обзор работ, проведенных в этом направлении главным образом в течение последних лет.

Поглощение в условиях диффузного падения

Измерения эквивалентного поглощения, рассчитанного на одного человека, были выполнены У. К. Сэбином [1] еще в 1900 г. Измеряя время реверберации в большом лекционном зале (1630 $м^3$), как при отсутствии публики, так и при различных заполнениях зала, Сэбин определил соответствующие приросты общего поглощения; деление их на число присутствующих (от 140 до 300 человек) привело к значениям от 0,39 до 0,42 $м^2$ на человека при частоте 512 *гц*. Приняв среднюю величину 0,40 $м^2$, Сэбин отметил, что она представляет разность эквивалентных поглощений сидящего человека и незамещенного сидения; эквивалентное поглощение, рассчитанное на одного человека вместе с сиденьем и полом, оказалось равным 0,44 $м^2$. Сэбин указал и на возможность оценки влияния публики посредством коэффициента поглощения, рассчитанного на единицу занимаемой ею площади; этот коэффициент получился равным $0{,}44/0{,}46 = 0{,}96$ при 100%-ном заполнении мест.

Если, как предполагал Сэбин, эквивалентное поглощение на одного человека не зависит от степени заполнения слушательских мест (хотя бы в интервале от 70 до 100%), то коэффициенты поглощения уже нельзя считать постоянными. Поэтому последующие работы были направлены

на измерение эквивалентных поглощений и на исследование частотной зависимости измеряемых значений. Отметим, однако, работу Мейера и Иордана [2], которые определили вносимое публикой поглощение в зале берлинской Филармонии во время концерта, используя при измерении реверберации fortissimo оркестра с последующей паузой. Полученные ими результаты воспроизведены на фиг. 1; обращает на себя внимание существенное различие эквивалентных поглощений при полном числе слушателей (2200 человек, кривая *1*) и при половинном заполнении (1000 человек, кривая *2*). В последнем случае эквивалентное поглощение на одного человека в области средних частот увеличивается почти вдвое.



Фиг. 1

Предположение о постоянстве эквивалентного поглощения (a) в различных залах Беранек [3—5] назвал «классическим постулатом» архитектурной акустики и подверг его убедительной критике спустя 60 лет после работ Сэбина.

Согласно классическому постулату общее поглощение в больших залах можно представить в виде суммы $A = \Sigma\alpha_i S_i + 4mV + Na$, где первый член представляет поглощение на ограничивающей поверхности $S = \Sigma S_i$, второй — поглощение в воздухе, пропорциональное объему V зала и погонному затуханию m, а третий — эквивалентное поглощение, вносимое публикой в количестве N человек. В области не слишком высоких частот последнее слагаемое настолько преобладает над остальными, что можно положить $A \cong Na$ и определить время реверберации приближенной формулой:

$$T \cong \frac{kV}{A} \cong \frac{k}{a} \cdot \frac{V}{N},$$

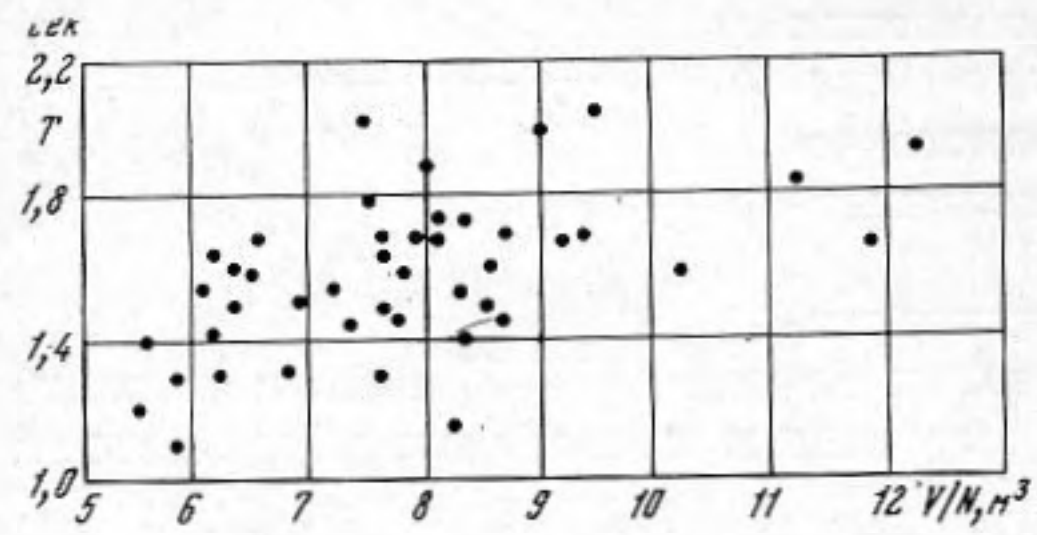
где k — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора единиц. Располагая результатами подробного обследования большого числа концертных залов и оперных театров [4], Беранек сопоставил измеренное в заполненных залах время реверберации (T) с удельной кубатурой (V / N). Результат такого сопоставления представлен на фиг. 2, где каждому из залов соответствует точка на координатной плоскости. Значительный разброс точек не позволяет предположить линейную зависимость T от V / N, требуемую классическим постулатом; можно лишь сказать, что T «в среднем» растет с увеличением V / N.

Взамен этого постулата Беранек предположил постоянство коэффициента поглощения, вносимого публикой, равномерно распределенной на площади мест. Если это предположение соответствует действительности, то в формуле Сэбина $T = kV / (\bar{\alpha}S + 4mV)$ средний коэффициент поглощения должен быть представлен в виде $\bar{\alpha} = \frac{1}{S}(\alpha_T S_T + \alpha_R S_R)$, где S_T — занимаемая публикой площадь с коэффициентом поглощения α_T (включая в эту площадь проходы между рядами и передний край), а α_R — коэффициент поглощения всей остальной части ограничивающей поверхности $S_R = S - S_T$. Из написанных соотношений следует, что

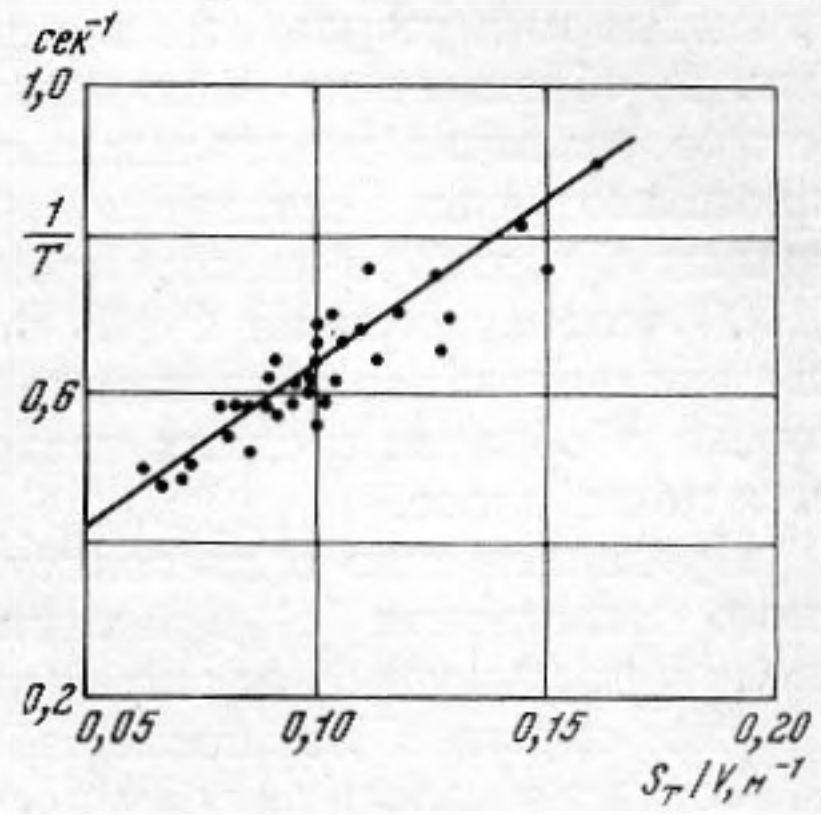
$$\frac{1}{T} = \frac{1}{k}(\alpha_T - \alpha_R)\frac{S_T}{V} + \frac{1}{k}\frac{S}{V}\alpha_R + \frac{4m}{k},$$

т. е. что величина $1 / T$ и S_T / V связаны между собой линейно. Проверка,

выполненная для тех же условий и залов, которые представлены на фиг. 2, подтвердила сделанное предложение, как это видно из фиг. 3. Здесь точки, соответствующие различным залам, хорошо ложатся на прямую. По ее наклону $(\alpha_T - \alpha_R) / k$ и по отрезку, отсекаемому на оси ординат при экстраполяции до $S_T / V = 0$, можно определить как α_T, так и α_R.



Фиг. 2



Фиг. 3

Значения коэффициентов поглощения на площади S_T, предлагаемые Беранеком в работах [4, 5], сведены в табл. 1.

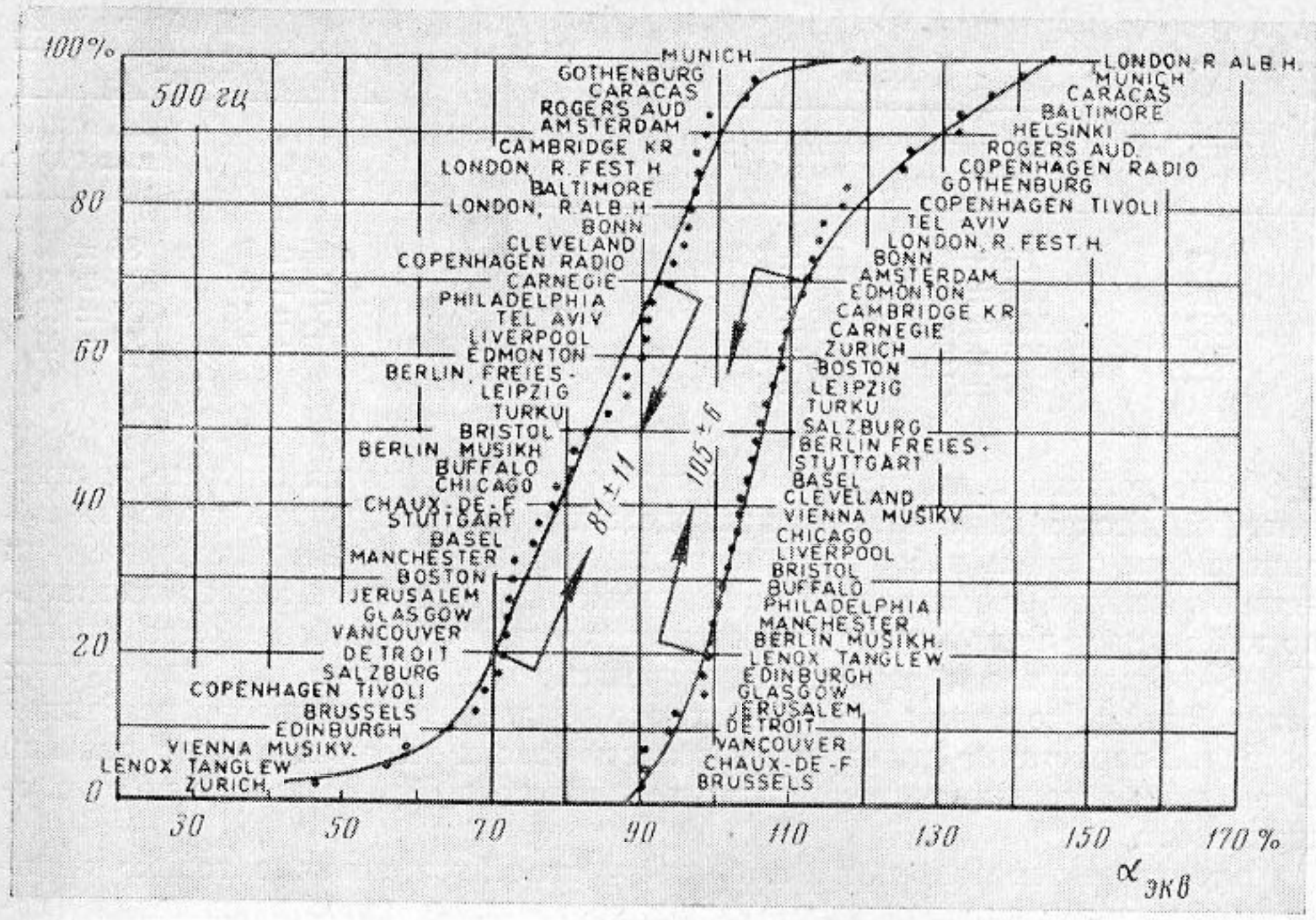
Основываясь на результатах статистической обработки экспериментальных данных [4], К. Костен [6] показал, что постоянство коэффициента поглощения, вносимого публикой, приводит к более общей формулировке постулата, который должен быть принят взамен классического. Согласно Костену «время реверберации нормального концертного зала при некоторой частоте может быть рассчитано по закону Сэбина $T = 0{,}163\ V / A$, по-

Таблица 1

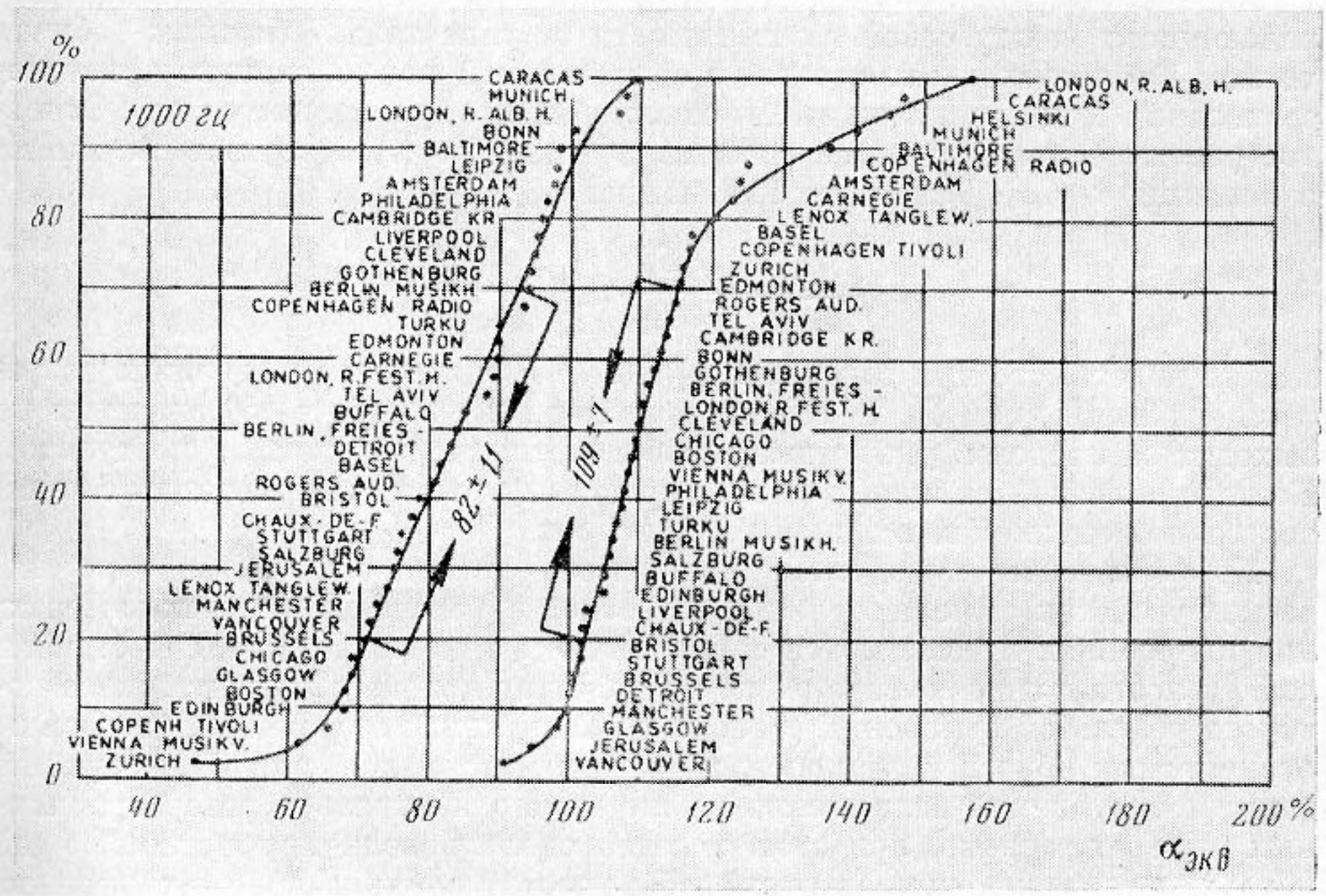
f, *гц*	67	125	250	500	1000	2000	4000	6000
[4]	0,34	0,52	0,68	0,85	0,97	0,93	0,80	0,80
[5]	0,25	0,39	0,57	0,80	0,94	0,92	0,87	0,80

лагая полное поглощение A равным $\alpha_{экв} S_T$, где $\alpha_{экв}$ — частотно-зависимая константа (см. табл. 2), а S_T определяется как площадь, занимаемая слушателями (хором) и оркестром, включая прилегающие к ней площади шириною до 1 *м*». Эквивалентный коэффициент поглощения $\alpha_{экв}$, конечно, не должен определяться как отношение поглощенной звуковой энергии к падающей и может превышать единицу (100%).

Сделанное Костеном обобщение хорошо подтверждается графиками интегрального распределения величин $\alpha_{экв}$ в пустых и заполненных залах. Два из этих распределений (для октавных полос со средними частотами 500 и 1000 *гц*) воспроизведены на фиг. 4 и 5. По оси ординат отложено процентное число залов, в которых $\alpha_{экв}$ меньше значения, даваемого абсциссой; левые кривые относятся к пустым, правые — к заполненным залам. Рассмотрим, например, правую кривую на фиг. 5. Если бы во всех залах константа $\alpha_{экв}$ равнялась 1,09, то кривая распределения имела бы вид ступенчатой функции, равной нулю при $\alpha_{экв} < 1{,}09$ и единице (т. е. 100%) выше этого значения. Оказывается, однако, что величины, вычисленные по фор-



Фиг. 4



Фиг. 5

муле $\alpha_{экв} = 0{,}163V / TS_T$, группируются вокруг среднего значения $\alpha_{экв} = 1{,}09$ с разбросом, который может быть обусловлен как ошибками измерений, так и зависимостью $\alpha_{экв}$ от типа мебели, степени диффузности поля, отношения S_T / V и т. п. Погрешность, возможная при измерении V, T и S_T, составляет $\pm 3\%$, $\pm 5\%$ и $\pm 3\%$ соответственно; кроме этого значение T обычно округляется до десятых долей секунды, что дает дополнительно еще $\pm 3\%$. Таким образом, оценка общей погрешности величиной

Таблица 2

Средняя частота октавы, *гц*	$\alpha_{экв}$ в залах		Средняя частота октавы, *гц*	$\alpha_{экв}$ в залах	
	заполненных (%)	незаполненных (%)		заполненных (%)	незаполненных (%)
63	85 ± 14	68 ± 13	2000	115 ± 7	86 ± 13
125	96 ± 11	76 ± 11	4000	129 ± 8	101 ± 13
250	100 ± 9	81 ± 11	6000	151 ± 16	127 ± 18
500	105 ± 6	81 ± 11	октава 500—1000	107 ± 7	81 ± 11
1000	109 ± 7	82 ± 11			

±8% не должна считаться завышенной. Основываясь на анализе распределений, Костен полагает, что приводимые в табл. 2 средние значения $\alpha_{экв}$ определены с очень небольшой погрешностью (±1%), а вычисленное с их использованием время реверберации может не совпасть с экспериментально найденным лишь вследствие несистематических ошибок в определении V и S_T. Отметим, что возможная погрешность в оценке $\alpha_{экв}$ для пустых залов больше, чем для заполненных; это объясняется разнообразием типов мебели. Возрастание дисперсии в области самых высоких частот связано с тем, что поглощение звука в воздухе зависит от объема зала, а не от площади мест.

Предлагаемые Костеном значения $\alpha_{экв}$ относятся, конечно, только к концертным залам; специфические особенности залов иного назначения (например, лекционных аудиторий или кинотеатров) могут приводить к значениям, отличающимся от данных в табл. 2.

Недавно Беранек [5] предложил новые значения $\alpha_{экв}$, несколько различающиеся между собой в зависимости от типа зала. Эти типы (общим числом 7) определены не столько в описательной форме, сколько путем перечисления существующих залов, относимых к тому или иному типу. Основное различие между типами связано, по-видимому, со средним значением отношения S_R / S_T. Действительно, написав

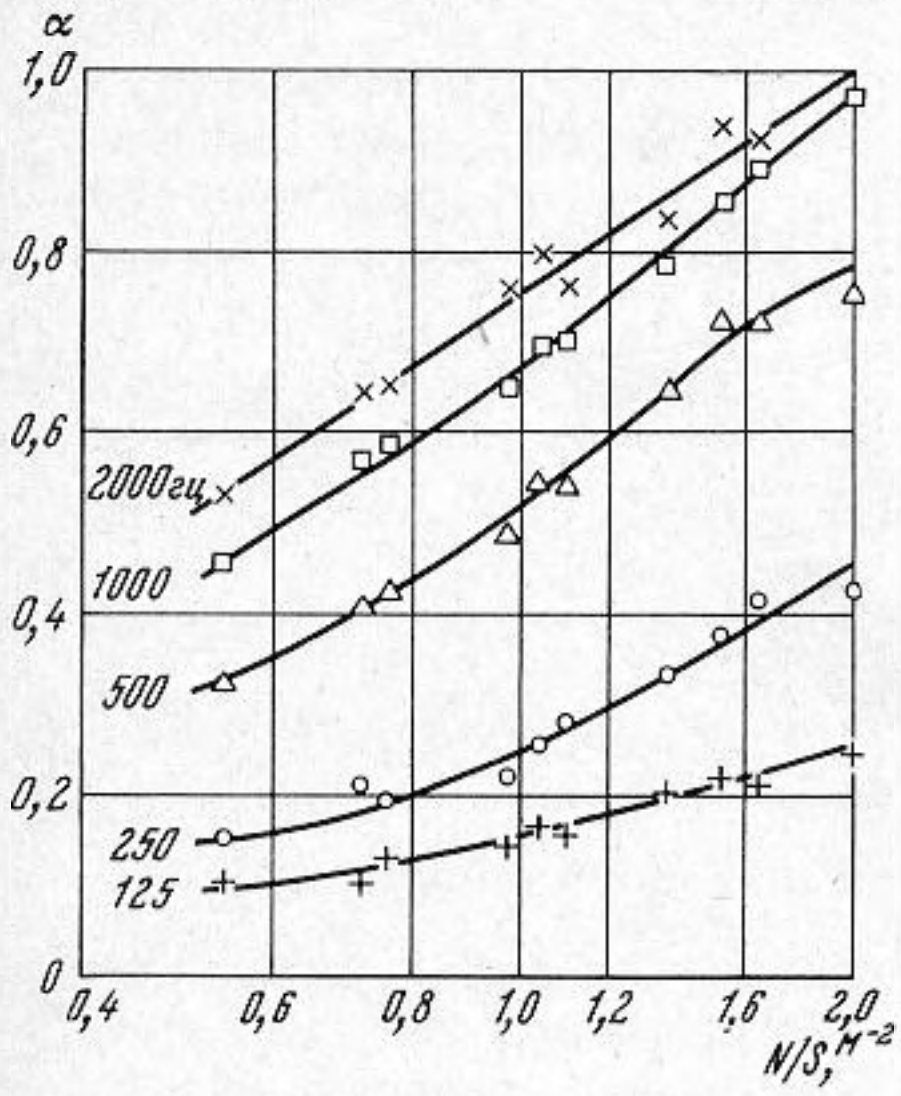
$$\alpha_{экв} = \alpha_T + \frac{S_R}{S_T}\alpha_R + \frac{4mV}{S_T},$$

можно видеть, что при заданных α_T и S_T / V значения $\alpha_{экв}$ должны возрастать с увеличением S_R / S_T. Однако приводимые в работе [5] значения не выходят за пределы, указанные в табл. 2; таким образом, за постулатом Костена сохраняется преимущество простоты расчета реверберации с количественной оценкой возможной погрешности.

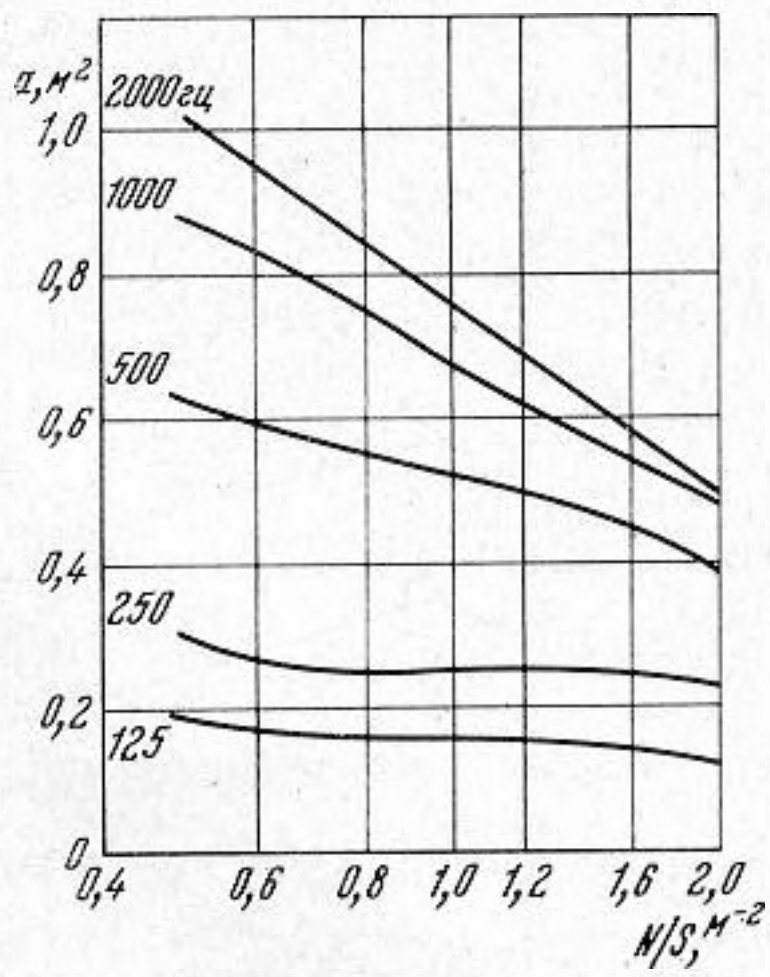
Коэффициенты звукопоглощения, используемые в архитектурно-акустических расчетах, измеряются, как известно, в реверберационных камерах; при измерениях принимаются специальные меры для повышения степени диффузности поля в камере и для исключения краевого эффекта, из-за которого результат измерения становится зависящим от размеров и формы исследуемых образцов звукопоглощающих материалов или конструкций. Вносимое публикой поглощение также можно измерять в реверберационных камерах, однако, при этом нелегко оценить величину поглощающей поверхности, исключить (или хотя бы учесть) влияние краевого эффекта и вместе с тем не нарушить условий высокой диффузности поля в процессе реверберации. Нельзя не считаться и с трудностью привлечения достаточно большого числа терпеливых испытуемых.

Наиболее систематические измерения реверберационного коэффициента, вносимого публикой поглощения были выполнены Мейером, Кунстманом и Куттруфом [7]. Высота камеры была достаточной для размещения над головами сидящих людей до 25 диффузно рассеивающих элементов (изогнутые листы плексигласа) с площадью по 2 $м^2$ каждый. Для того, чтобы исключить краевой эффект, ряды деревянных стульев занимали

всю площадь пола (49 $м^2$); только у одной из стен был оставлен узкий проход для доступа к местам. Измерения на терц-полосах шума делались при различных заполнениях наличной площади с тем, однако, чтобы свободные места всегда распределялись более или менее равномерно. Коэффициент поглощения на площади мест (α) и эквивалентное поглощение, рассчитанное на одного человека (a), определялись по измеренным значениям реверберации на основе формулы Эйринга.



Фиг. 6



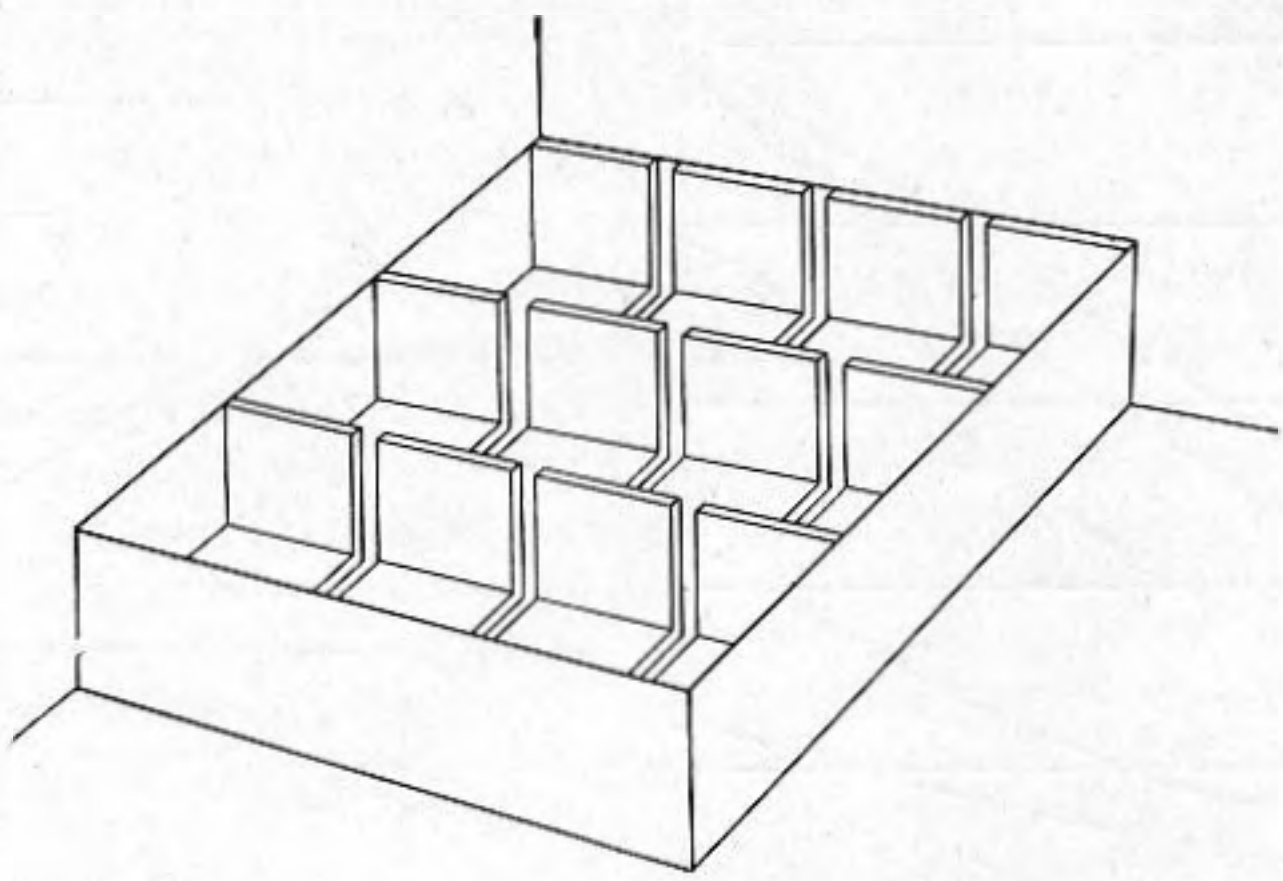
Фиг. 7

Результаты измерений представлены в функции от плотности заполнения площади мест (N / S) на фиг. 6 и 7; параметром семейства кривых является средняя частота терц-полосы. Как и следовало ожидать, коэффициенты α растут с увеличением N / S, тогда как эквивалентные поглощения a при этом убывают; таким образом, ни одна из этих двух величин не остается постоянной в условиях различного заполнения.

Для оценки влияния краевого эффекта на площади мест был сделан средний проход шириною в 2 *м*. Измерения, сделанные сначала при заполнении обеих частей площади, а затем при заполнении только одной из них, дали очень близкие результаты, практически не отличающиеся от тех, которые были получены ранее с использованием всей площади пола. Это привело авторов к выводу, что краевой эффект не повлиял на результаты измерений. Наряду с этим авторы, основываясь на приближенных оценках, не сочли необходимыми поправки на возрастание эффективного звукового давления вблизи от стен и на уменьшение воздушного объема камеры при ее заполнении людьми.

В работах Ката и Куля [8, 9] приводятся, среди прочих, результаты измерения коэффициентов поглощения α в реверберационной камере, где 12 человек размещались на жестких стульях с плотностью $N / S = 2$ $м^{-2}$. Для исключения краевого эффекта площадь мест двумя сторонами примыкала к стенам камеры, а с двух других сторон была ограждена деревянным барьером высотою 1 *м* (фиг. 8). Поправка на возрастание давления вблизи от стен учитывалась тем, что измеренный прирост поглощения делился не на фактическую площадь мест, а на некоторую «действующую» поверхность, увеличенную по каждому из направлений на $\lambda / 8$. Представленные на фиг. 9 (кривая *1*) значения α при их сравнении с приводимыми в работе [7] оказываются существенно меньшими: так, например, при частоте 500 *гц* находим из фиг. 9 $\alpha \cong 0{,}5$, тогда как согласно фиг. 6 при той же плотности размещения имеем $\alpha = 0{,}78$. Расхождение может быть

связано как с различной оценкой поглощающей поверхности, так и с недостаточно высокой диффузностью звукового поля в камере. Это последнее предположение косвенно подтверждается тем, что результаты Ката и Куля удовлетворительно совпали с данными натурных измерений в большой аудитории, где диффузность поля едва ли могла быть значительной. При возрастании степени диффузности измеряемые коэффициенты поглощения, как правило, получаются более высокими.



Фиг. 8

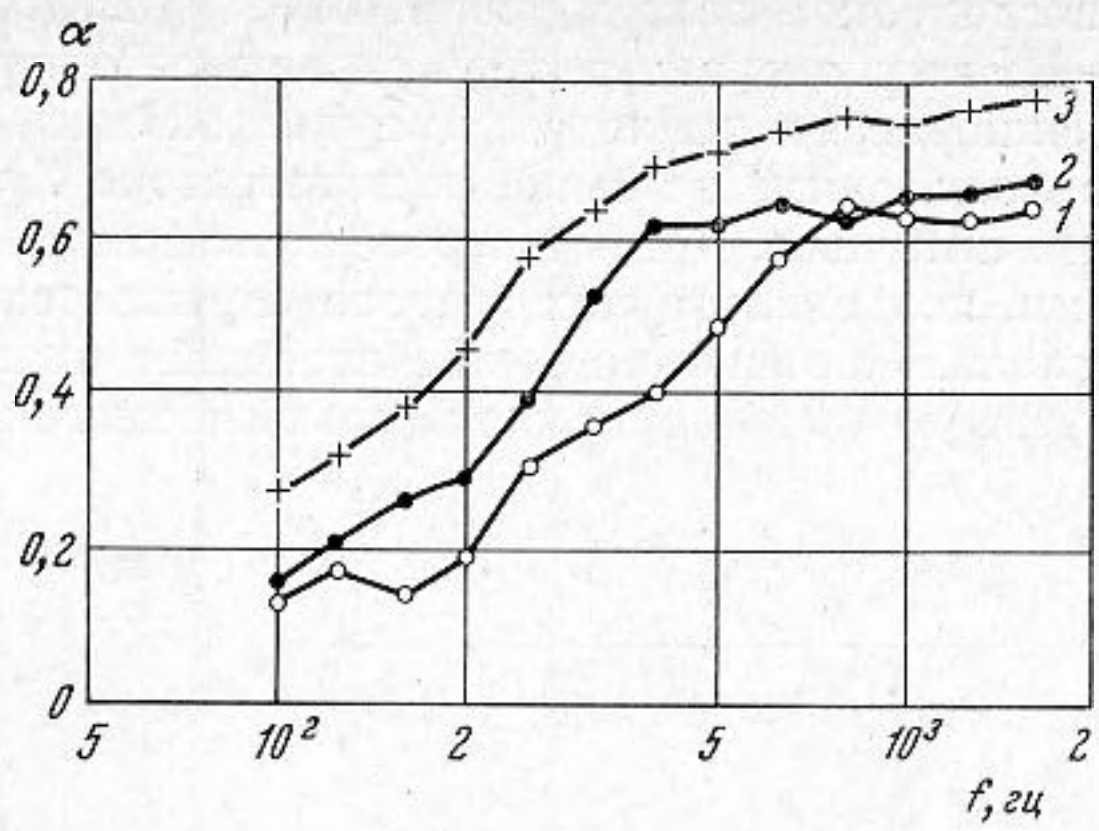
Существующая в настоящее время тенденция устанавливать в залах общественного назначения мягкую мебель оправдана не только по соображениям комфортабельности, но и с акустической точки зрения: при этом условия слухового восприятия значительно меньше зависят от заполнения, чем в залах с жесткой мебелью. В этом можно убедиться из сравнения поглощений, вносимых незамещенными (фиг. 9, кривая *2*) и замещенными (кривая *3*) мягкими креслами с откидным сидением. Приводимые данные получены в реверберационной камере и хорошо согласуются с результатами натурных измерений [9].

Поглощение, вносимое отдельно сидящими или стоящими людьми, в той или иной мере превышает значения, измеряемые при плотном размещении публики в аудиториях и концертных залах. В частности, еще Сэбином было установлено, что эквивалентное поглощение, рассчитанное на изолированно сидящего человека, составляет 0,48 $м^2$ для мужчин и 0,54 $м^2$ для женщин. Несомненная зависимость поглощения от одежды была обстоятельно исследована Катом [10]. Измерения делались в реверберацион-

Таблица 3

Объект измерения	Эквивалентное поглощение a ($м^2$) при частоте					
	125	250	500	1000	2000	4000 *гц*
Сидящие мужчины:						
в зимнем пальто	0,14	0,40	0,71	1,07	1,20	1,26
в костюме	0,11	0,33	0,69	0,97	1,03	1,07
в летнем костюме	0,11	0,23	0,56	0,78	0,88	0,89
в плавках	0,03	0,03	0,09	0,16	0,17	0,27
Сидящие женщины:						
в зимнем пальто	0,11	0,34	0,66	0,88	0,84	0,87
в летнем платье	0,00	0,10	0,17	0,37	0,47	0,58
в куп. костюме	0,00	0,05	0,07	0,13	0,17	0,23

ной камере; мужчины или женщины в одежде того или иного вида рассаживались на жестких стульях (или стояли) достаточно далеко друг от друга. Некоторые из полученных результатов представлены в таблице 3.

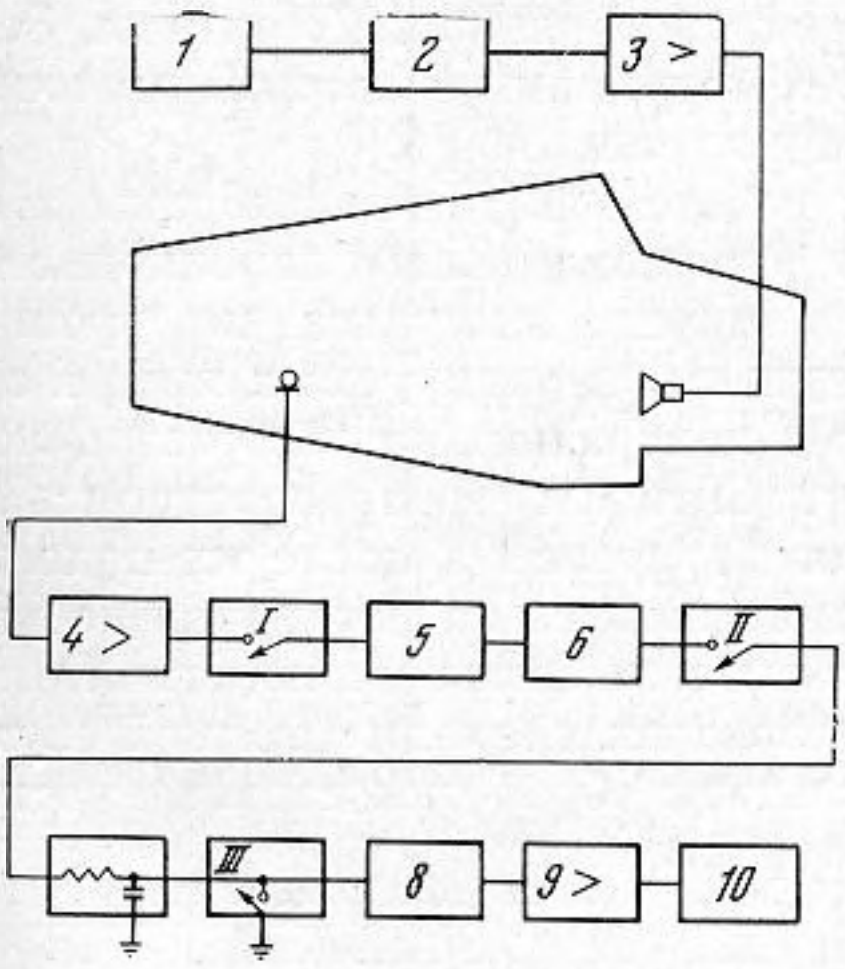


Фиг. 9

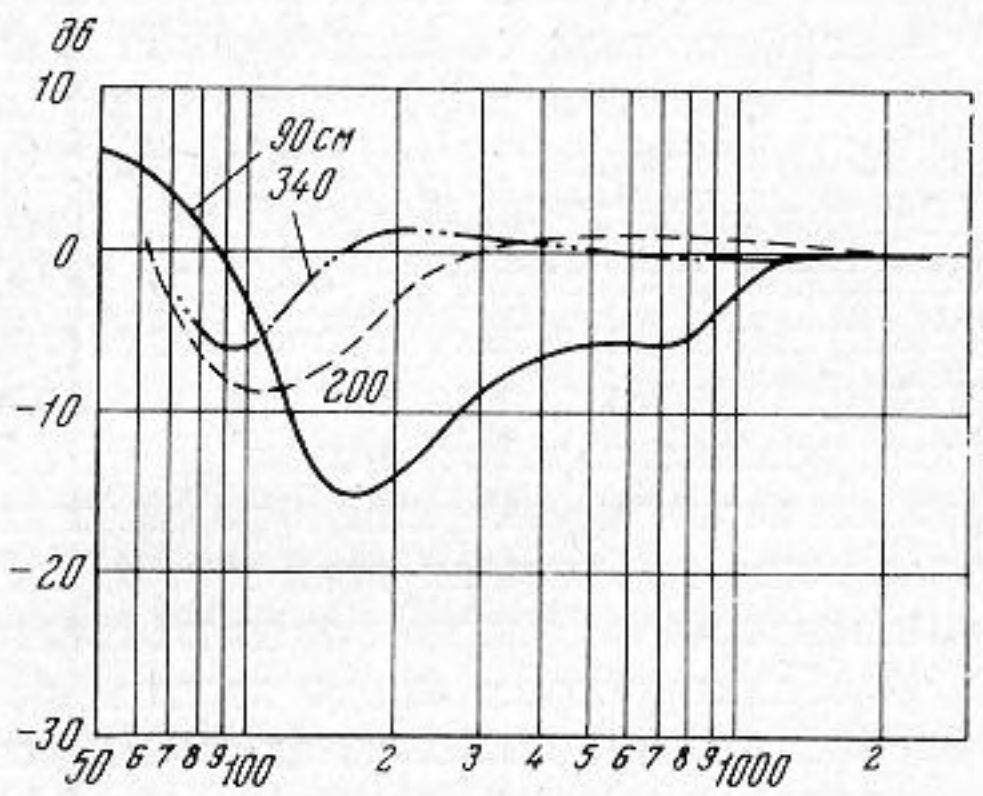
Если в начале столетия, когда проводил свои измерения Сэбин, женщины поглощали больше мужчин, тогда как в настоящее время имеет место обратное соотношение, то это произошло вследствие изменения моды женской одежды: в летнем сезоне женщины одеваются теперь значительно легче, чем 70 лет тому назад. Заметим также, что по данным работы [10] в области частот выше 1000 *гц* стоящий человек поглощает примерно на 25—30% больше сидящего.

Поглощение при скользящем распространении

Ослабление звука при его распространении над рядами слушательских мест оказывается качественно и количественно различным в нижней и в верхней части звукового диапазона. В области низких частот (<500 *гц*) эффект лишь незначительно зависит от наличия или отсутствия публики; напротив, при частотах выше 1000 *гц* ослабление обусловлено именно рядами сидящих людей.



Фиг. 10

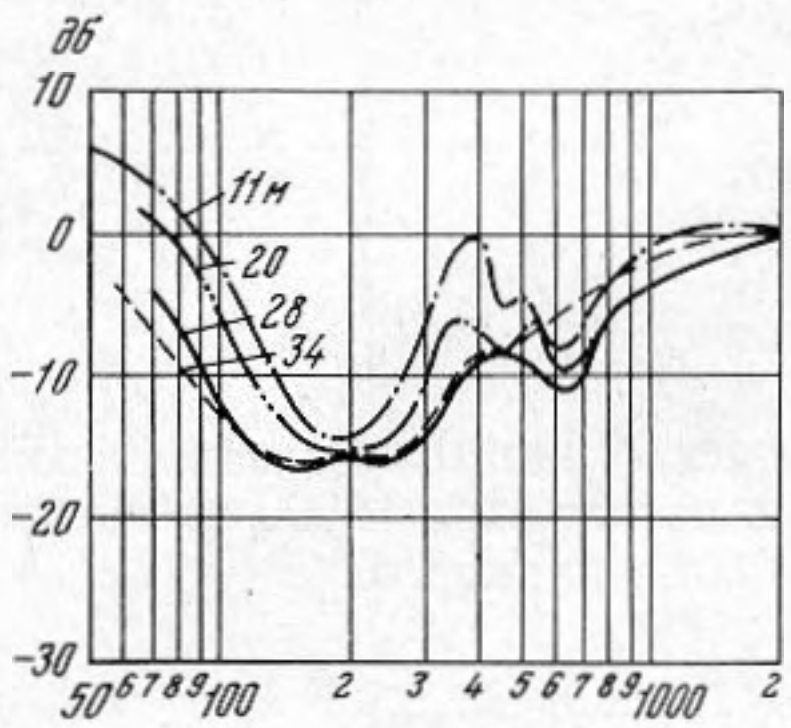


Фиг. 11

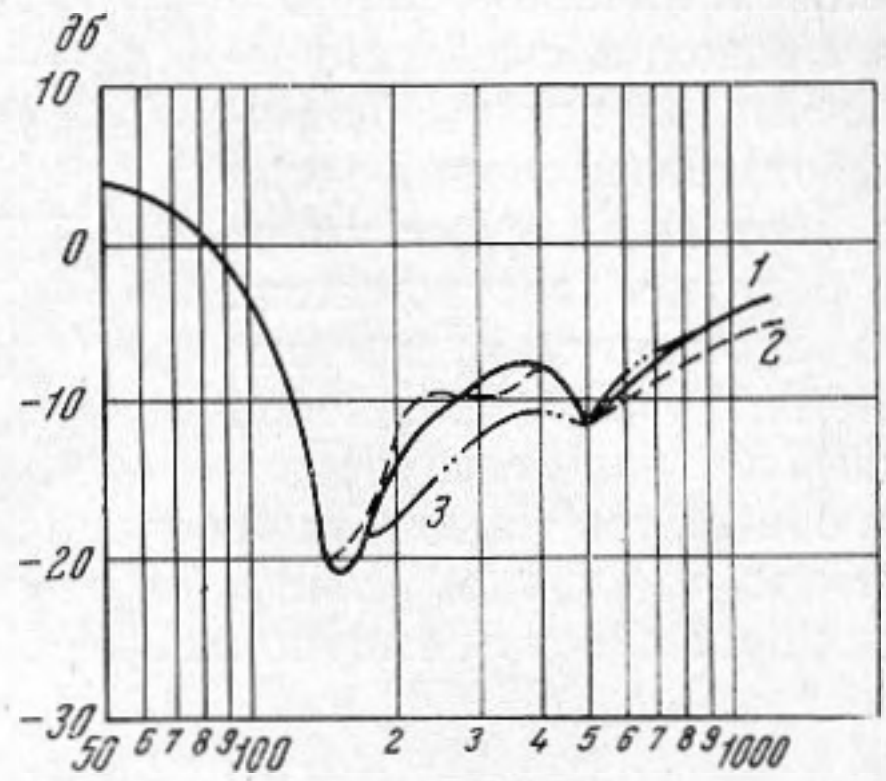
Исследованию низкочастотного диапазона посвящены опубликованные почти одновременно работы Шульца и Уотерса [11] и Сесслера и Уэста [12], различающиеся по методике измерений, но полностью совпадающие по основным выводам.

Блок-схема измерительного тракта, использованного в работе [11], изображена на фиг. 10. Гетеродинный генератор *1* выдает синусоидальный сигнал с медленно возрастающей частотой; этим сигналом заполняются прямоугольные импульсы длительностью 16 или 32 *мсек* при частоте следования 1 *сек*$^{-1}$. После усиления *3* сигналы излучаются громкоговорителем

в исследуемом зале и усиливаются усилителем. Быстродействующие реле *I—III* в приемном тракте управляются генератором импульсов *2*. Непосредственно перед приходом импульса к микрофону реле *III* замыкается на 1,5 *мсек*, снимая с емкости интегратора *7* заряд, оставшийся от предыдущего импульса. Когда это реле размыкается, а реле *I* и *II* остаются замкнутыми, конденсатор интегратора заряжается от принимаемого микрофоном сигнала. Размыкание реле *I* позволяет интегрировать так или иначе ограниченную начальную часть принимаемого импульса; интеграция происхо-



Фиг. 12



Фиг. 13

дит после октавного фильтра *5* и квадратора *6*. Реле *II* остается замкнутым в течение времени, достаточного для того, чтобы в интегратор попал весь «хвост» напряжения на выходе фильтра. Результат измерения фиксируется самописцем *10* в виде частотной характеристики средних уровней эффективного звукового давления в интервалах порядка 1/12 октавы. Запись характеристики осуществляется после модуляции *8* сетевой частоты (60 *гц*) исследуемым сигналом с последующим усилением *9*.

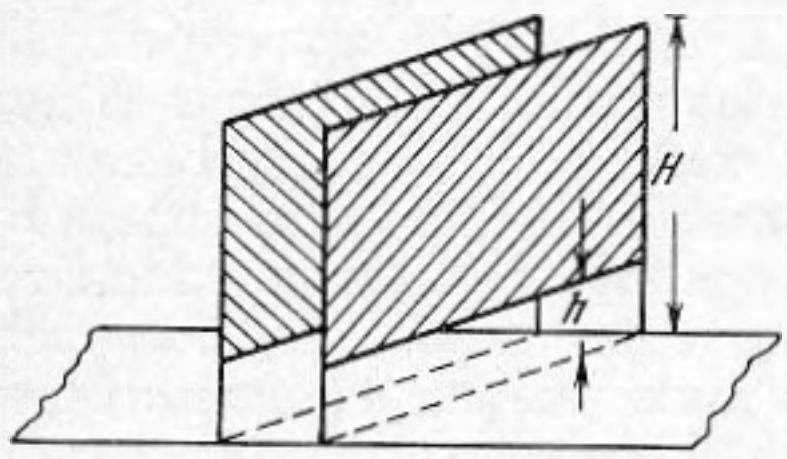
В качестве измерительных сигналов в работе [12] были выбраны импульсы с колоколообразной огибающей и синусоидальным заполнением; при длительности в 24 *мсек* спектральная ширина импульса на уровне —3 *дб* составляла 54 *гц*. Набор таких импульсов, генерируемых цифровой ЭВМ, включал 23 измерительных сигнала с центральными частотами, лежащими в диапазоне от 83,3 до 1000 *гц*. Сигналы воспроизводились в исследуемом зале ненаправленным громкоговорителем и после их приема микрофоном в той или иной точке поля записывались на магнитной ленте. Последующая обработка записей на ЭВМ включала фильтрацию, калибровку и вычисление энергий в различных интервалах времени (прямой звук, отражения от боковых стен и т. д.). Результаты обработки автоматически записывались в функции от частоты или координаты.

В обеих работах представлены результаты как натурных измерений в больших концертных залах, так и исследований на уменьшенных (1 : 10) моделях. Основные выводы можно сформулировать следующим образом.

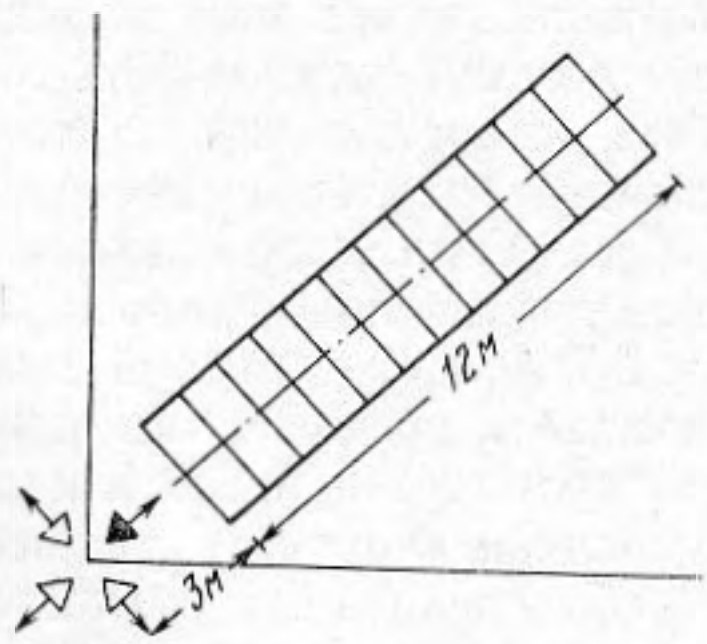
1. Избыточное ослабление звука, остающееся после вычитания того, которое связано со сферическим расхождением прямой волны при ее распространении над рядами пустых кресел, достигает максимума (до 15 *дб*) в области низких частот (150—200 *гц*). Как при более низких, так и при более высоких частотах ослабление уже не столь значительно. Эффект постепенно исчезает по мере подъема над уровнем, соответствующим положению головы сидящего слушателя. В качестве иллюстрации на фиг. 11 представлены частотные характеристики избыточного ослабления прямого звука, измеренные на трех уровнях (90, 200 и 340 *см* над полом) в большом концертном зале (Монреаль).

2. Избыточное ослабление лишь незначительно возрастает с пробегом волны, как это видно, например, из характеристик, снятых в партере зала «Симфони Холл» (Бостон) на расстояниях 11, 20, 28 и 34 *м* от сцены (фиг. 12).

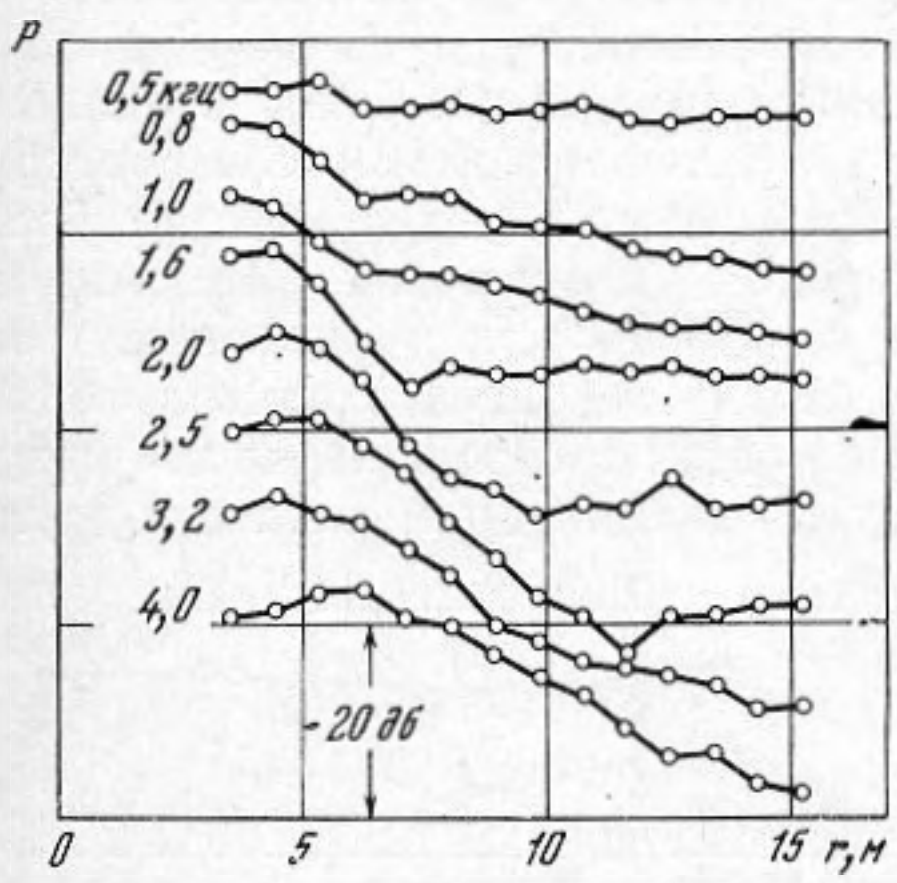
3. Ослабление не меняется при заполнении зала публикой. Частотные характеристики, представленные на фиг. 13, измерены при отсутствии



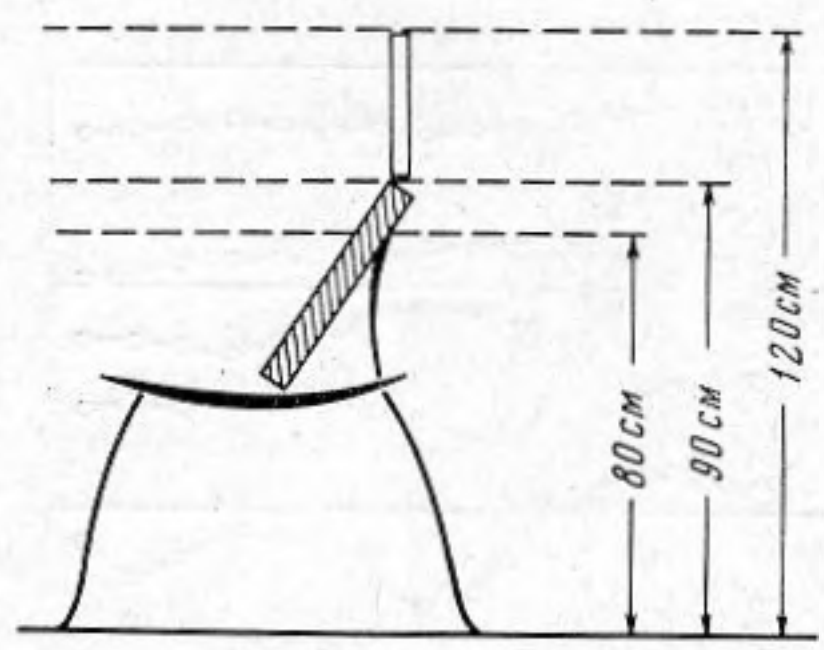
Фиг. 14



Фиг. 15



Фиг. 16



Фиг. 17

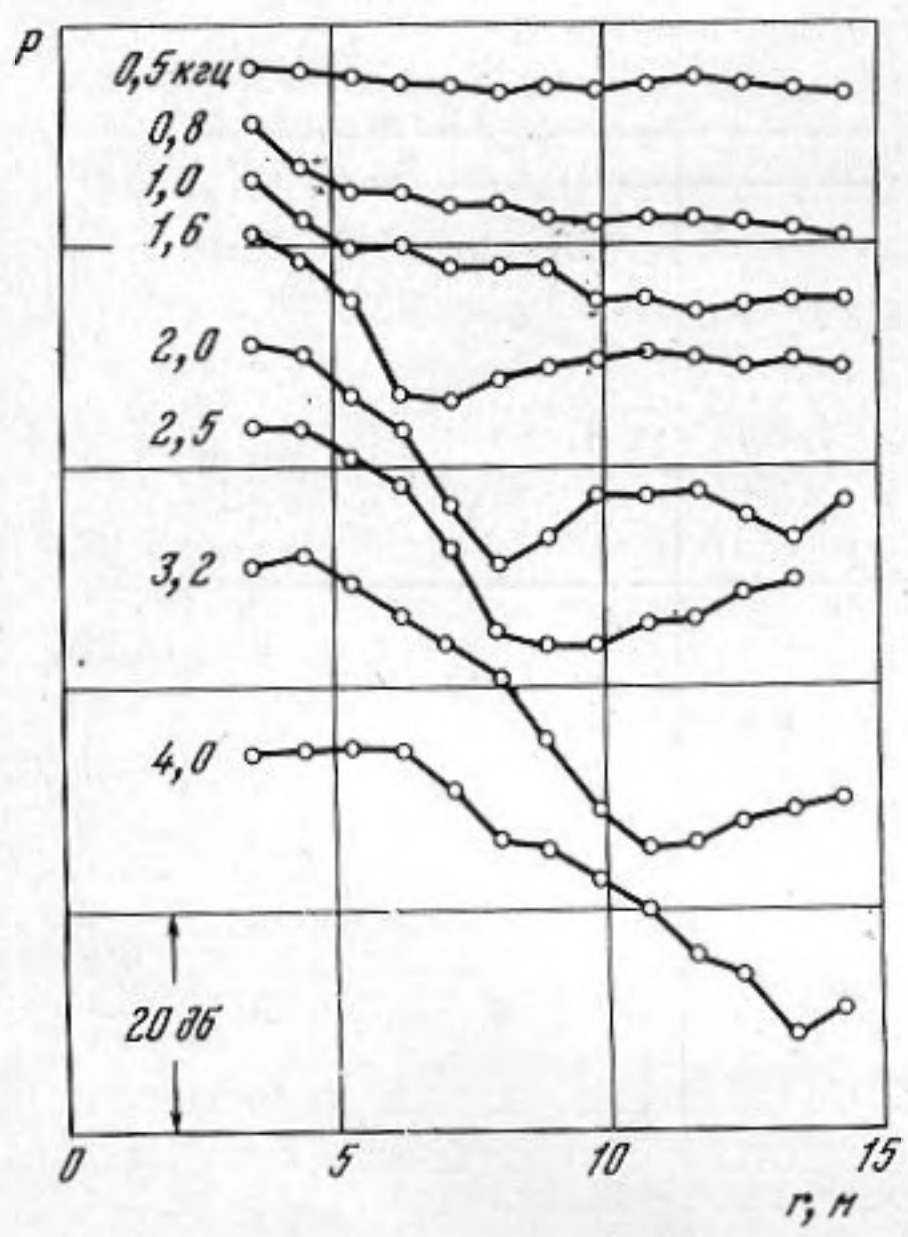
людей (кривая *1*) и при заполнении 8 рядов сначала перед измерительным микрофоном (кривая *2*), а затем за ним (кривая *3*). Сравнение кривых показывает, что наличие публики не влияет сколько-нибудь существенно на наблюдаемый эффект.

Как показало исследование на моделях, ослабление звука в области низких частот нельзя объяснить действием одного единственного фактора. Широкополосное (в диапазоне 2 — 2,5 октав) ослабление связано с дифракцией от верхнего края кресел. Селективный эффект обусловлен вертикальным резонансом воздушного объема между рядами; резонансная частота зависит только от высоты рядов, но не от расстояния между ними. Исследование влияния просвета между «полом» модели и поперечными планками, моделирующими параллельные ряды кресел, показало, что при наличии просвета высотой h (фиг. 14) резонансная частота близка к $c / 2(H - h)$, где c — скорость звука, H — высота рядов; это соответствует собственной частоте трубы высотой $H - h$, открытой с обоих концов. Если просвет отсутствует, то резонанс наступает при частоте $c / 4H$, как в случае трубы, закрытой с одного конца и открытой с другого.

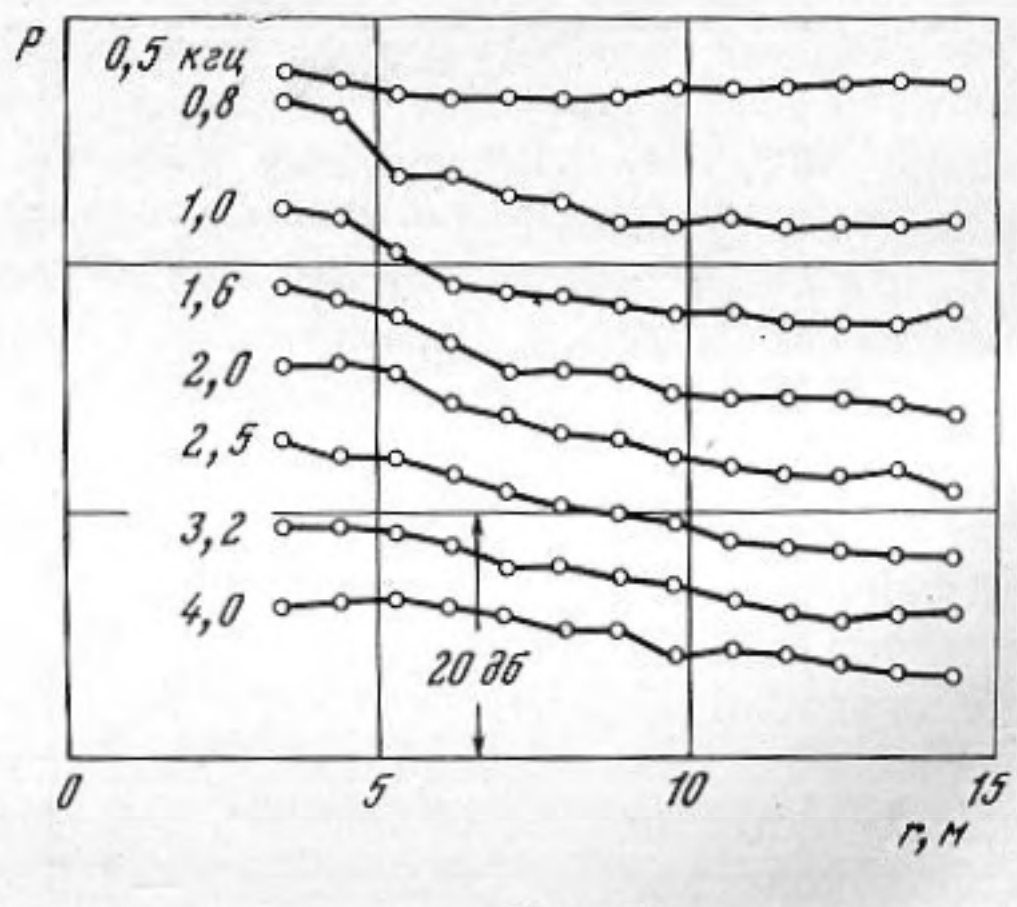
В работе [11] отмечается, что, несмотря на значительное ослабление прямого звука (и некоторых ранних отражений) в нижней части спектра, слушатели в партере концертного зала не ощущают нарушений тонального баланса; по-видимому, это объясняется повышенной спектральной плотностью энергии реверберирующего звучания в той же области частот.

Первое экспериментальное исследование избыточного ослабления звука, распространяющегося над сидящими людьми, было выполнено Бекеши [13] еще в самом начале 30-х годов. До сравнительно недавнего времени эта работа оставалась единственным источником информации о количественной мере затухания, вносимого публикой при скользящем распространении. Измерения были сделаны на открытом воздухе, причем люди размещались рядами по 4 человека на скамьях, поставленных друг за другом с шагом 0,7 *м*. Перед первой скамьей на высоте 40 *см* над уровнем голов устанавливался громкоговоритель; измерительный сигнал поочередно подводился к громкоговорителю и к одноухому телефону наблюдателя, который должен был регулировать уровень принимаемого через телефон сигнала с тем, чтобы сделать его равногромким с таким же сигналом, излучаемым громкоговорителем. Разность уровней, установленных наблюдателем при наличии и при отсутствии людей, является мерой вносимого ими затухания. Оказалось, что при наибольшем удалении наблюдателя от громкоговорителя (12 *м*) затухание достигало 10—15 *дб* в области частот выше 1000 *гц* и быстро убывало с повышением точки наблюдения.

Измерения Мейера, Куттруфа и Шульте [14] также были выполнены в условиях неограниченного пространства, в известном смысле повторяя работу Бекеши, но с гораздо более широкой программой. Источником звука здесь служил рупорный громкоговоритель, поставленный вблизи от вершины прямого угла между двумя стенами примыкающих друг к



Фиг. 18



Фиг. 19

другу зданий (фиг. 15). Мнимые источники при низких частотах работают синфазно с действительным, так что интерференционные эффекты можно считать исключенными; при высоких же частотах отражения от стен становятся несущественными вследствие обострения направленности громкоговорителя. Ряды мест (по 6 стульев в каждом) располагались вдоль биссектрисы прямого угла с шагом 0,9 *м*; отражение от асфальта между громкоговорителем и первым рядом устранялось звукопоглощающим матом. В измерениях участвовало до 100 человек, преимущественно мужчин.

В качестве измерительных сигналов применялись терц-полосы шума в диапазоне частот от 500 до 4000 *гц*. Предварительной проверкой было установлено, что при отсутствии людей звуковое давление убывает с расстоянием как $1/r$. Все приводимые ниже данные характеризуют только избыточное затухание, остающееся после поправки на пространственное рассеяние звуковой энергии.

На фиг. 16 представлено снижение соответственно откорректированного уровня сигналов различной частоты при условии, что микрофон и громкоговоритель установлены на высоте головы сидящих людей (1,15 *м*). Оставаясь сначала постоянным или даже несколько возрастая, этот уровень затем быстро падает с расстоянием от громкоговорителя. При дальнейшем удалении измерительного микрофона избыточное затухание практически уже не возрастает. С возрастанием частоты область быстрого спада уровня смещается в сторону большего удаления. При подъеме громкоговорителя и микрофона затухание уменьшается, исчезая почти полностью, когда они подняты на высоту 1,6 *м*.

Тот факт, что терпение пассивных участников работы не безгранично, побудил изыскать модель, качественно и количественно имитирующую влияние слушателя на затухание звука при скользящем его распространении. Модель, изображенная на фиг. 17, как оказалось, хорошо удовлетворяет этому условию. Заметим, что дощечка из твердого дерева с размерами $28 \times 18 \times 2$ *см* в верхней части модели играет роль головы человека (как будет видно из дальнейшего, эту роль пришлось признать ведущей); активные потери представлены в модели минераловатной пластиной ($50 \times 50 \times 5$ *см*), наклонно поставленной на сиденье деревянного стула. Достигнутая высокая точность моделирования убедительно подтверждается сравнением кривых, измеренных с «натуральной» (фиг. 16) и с «искусственной» (фиг. 18) публикой. Возможность имитации публики позволила не только значительно расширить объем работы, но и ввести в ее программу измерения, в натурных условиях невыполнимые.

Имеются веские основания предполагать, что рассеяние звука головами людей при скользящем распространении более или менее существенно влияет на зависимость уровня сигнала от пройденного расстояния. Для количественной оценки этого влияния исследовалось распространение звука над модельной публикой, при чем использовались описанные выше модели, только без дощечек в верхней части.

Результат таких измерений представлен на фиг. 19; его сравнение с кривыми фиг. 18 показывает, что затухание значительно уменьшилось и стало более равномерным. Небезынтересно отметить, что наличие или отсутствие звукопоглощающих пластин на сиденьях стульев мало влияет на ход кривых фиг. 18. Это свидетельствует о том, что именно дифракция является основным фактором, определяющим затухание волн, распространяющихся над периодически расчлененной структурой [15].

Прямыми экспериментами, в ходе которых верхние дощечки устранялись лишь у той или иной части модельной публики, было доказано, что избыточное затухание связано главным образом с рассеянием звука в рядах, расположенных перед измерительным микрофоном. Рассеяние же от позади находящихся рядов (в направлении к источнику сигнала) играет второстепенную роль.

Измерения затухания при распространении звука над публикой, размещенной на скамьях в зеленом театре и у открытой эстрады в московских парках, привели Макриненко [16] к оценкам, по порядку величины совпадающим с ранее опубликованными данными. Особого внимания заслуживает зависимость затухания от высоты источника звука при неизменной высоте измерительного микрофона (на уровне ушей сидящего слушателя). Когда источник измерительного сигнала расположен на высоте 1,6 *м* выше этого уровня, то на расстоянии около 20 *м* избыточное затухание в области средних частот не превышает 4 *дб*, а при высоте 30 *см* оно возрастает до

10 — 12 *дб*. Таким образом, даже тогда, когда места слушателей располагаются на горизонтальной плоскости, затуханием за счет скользящего распространения можно пренебрегать, если только источники звука находятся на достаточной высоте (не менее 1,5 *м*) над головами людей.

ЛИТЕРАТУРА

1. W. C. Sabine. Collected papers. 1937, 3—68.
2. E. Meyer, V. Jordan. Nachhallzeiten von Konzerträumen und Schallschluckung der Zuhörerschaft. ENT, 1935, **12** (7), 213—220.
3. L. L. Beranek. Audience and seat absorption in large halls. J. Acoust. Soc. America, 1960, **32** (6), 661—670.
4. L. L. Beranek. Music, acoustics and architecture. N. Y., 1962, 541—554.
5. L. L. Beranek. Audience and seat absorption in large halls. II. J. Acoust. Soc. America, 1969, **45** (1), 13—19.
6. C. W. Kosten. New method for calculation of the reverberation time of halls for public assembly. Acustica, 1965/66, **16** (6), 325—330.
7. E. Meyer, D. Kunstmann und H. Kuttruff. Über einige Messungen zur Schallabsorption von Publikum. Acustica, 1964, **14** (2), 119—124.
8. U. Kath, W. Kuhl. Messungen zur Schallabsorption von Personen auf ungepolsterten Stühlen. Acustica, 1964, **14** (1), 50—55.
9. U. Kath, W. Kuhl. Messungen zur Schallabsorption von Polsterstühlung mit und ohne Personen. Acustica, 1965, **15** (2), 127—131.
10. U. Kath. Der Einfluss der Bekleidung auf die Schallabsorption von Einzelpersonen. Acustica, 1966, **17** (4), 234—237.
11. Th. J. Schultz, B. G. Watters. Propagation of sound across audience seating. J. Acoust. Soc. America, 1964, **36** (5), 885—896.
12. G. M. Sessler, J. E. West. Sound transmission over theatre seats. J. Acoust. Soc. America, 1964, **36** (9), 1725—1732.
13. G. v. Bekesy. Über die Schallfeldverzerrung in der Nähe von absorbierenden Flächen und ihre Bedeutung fur die Raumakustik. Z. techn. Phys., 1933, **14**, 6—10.
14. E. Meyer, H. Kuttruff, F. Schulte. Versuche zur Schallausbreitung über Publikum. Acustica, 1965, **15** (3), 175—182.
15. D. Kunstmann. Modelluntersuchungen zur Schallausbreitung über Publikum (Schallstreuung an Kugelzeilen). Acustica, 1967, **18** (5), 259—273.
16. Л. И. Макриненко. Затухание звука при его распространении над публикой. Научные труды НИИ стройфизики, М., 1967, 2, 156—161.

Всесоюзный н.-и. кинофотоинститут
Москва

Поступила в редакцию
12 декабря 1969 г.