АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XI 1965 Вып. 3

УДК 534.843.12

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИМПУЛЬСНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В ЗАЛАХ

Л. Б. Прейзер

Рассмотрен вопрос о целесообразности применения импульсных измерений для исследования акустических свойств закрытых помещений. Обсуждаются условия выбора на основе результатов измерений числового показателя, характеризующего временну́ю структуру совокупности отраженных сигналов в различных точках помещения, а также особенности методики измерения, аппаратуры и свойств измерительного сигнала.

При наметившейся в последнее время тенденции преимущественного использования статистико-геометрического подхода к исследованию акустики помещения, большое развитие получили импульсные методы измерений. Следует полагать, на основе очевидных соображений, что осциллограммы отраженных звуковых импульсов в помещении содержат определенную информацию о характерных особенностях акустического сигнала в тех или иных точках помещения. Действительно, амплитуда и время запаздывания отдельных отражений в процессе затухания звука определяются размерами помещения, расположением и акустическими свойствами всех его ограничивающих поверхностей, взаиморасположением источника и приемника звука; другими словами, эти отражения и являются проявлением того воздействия, которое оказывает помещение на излучаемый в нем сигнал. В частности, представляет интерес проблема выбора, на основе результатов измерений, числового показателя, в определенной степени коррелирующего с условиями восприятия акустического сигнала.

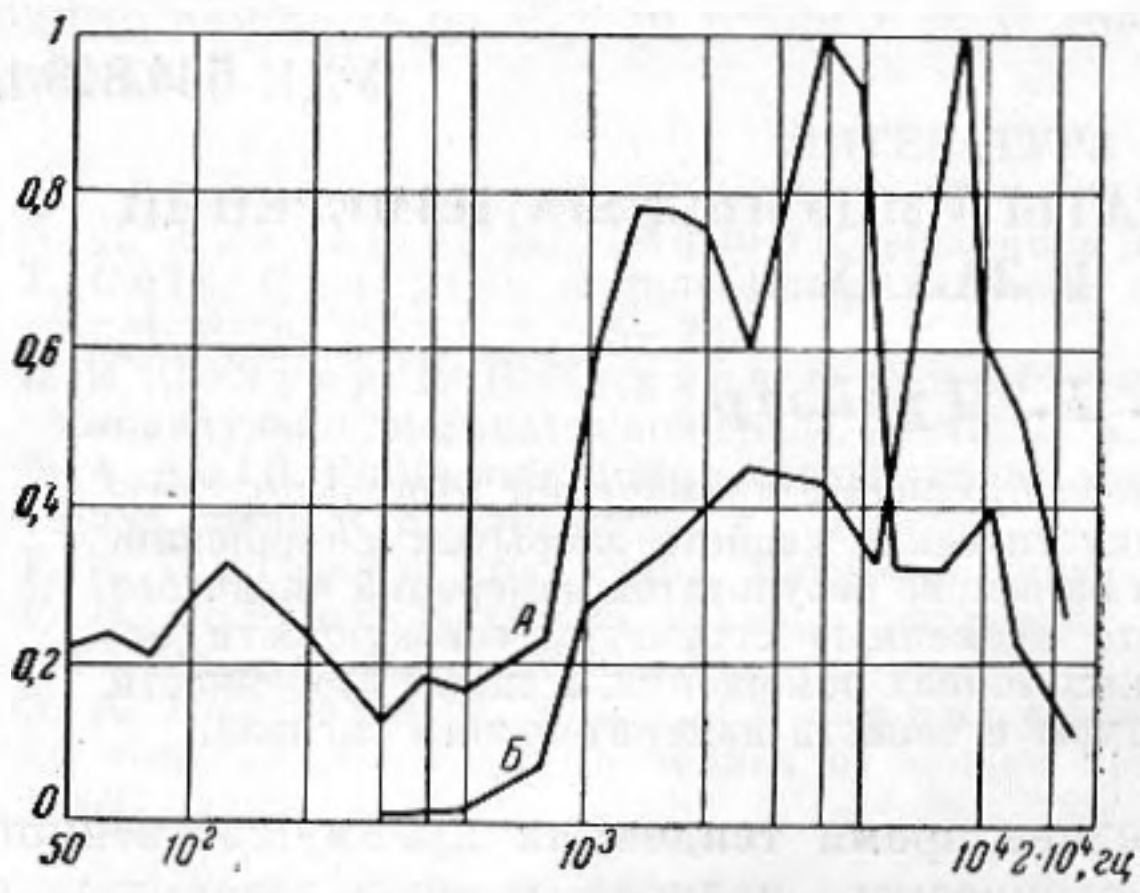
Некоторые предпосылки, свидетельствующие о возможности существования показателя, удовлетворяющего такому требованию, содержатся в том известном из практики архитектурно-акустических измерений обстоятельстве, что запаздывающие повторения основного сигнала, возникающие в результате отражений звука в большом помещении, должны быть разделены, в зависимости от времени их запаздывания, на две качественно неравноценные части: полезную и вредную. Фурдуевым [1] была выдвинута мысль, что полезными следует считать эхо-сигналы, способные интерферировать с прямым звуком. Такие сигналы приводят к полезному усилению основного сигнала и обогащению его звучания. Другими словами, полезными считаются те первые отражения, для которых время запаздывания относительно прямого звука не превышает интервала когерентности сигнала, излучаемого в помещении.

В этой связи представляет определенный интерес исследование характерных свойств временно́й структуры ранних отражений, возникающих в процессе послезвучания.

Выдвинутое выше требование — связь с условиями восприятия — оказывается, однако, недостаточным при выборе числового показателя. Хорошо известное из опыта эксплуатации различных залов обстоятельство, заключающееся в том, что в каждом из них существуют, как правило

зоны слушательских мест с неодинаковыми условиями слышимости, дает основание считать целесообразным привлечение второго важного условия выбора показателя — требования локальности этого параметра. Другими словами, выбираемый числовой показатель должен быть «чувствительным» к различиям в акустических условиях для разных зон слушательских мест в помещении.

Метод импульсных измерений заключается в том, что в средней части сцены, на которой в условиях нормальной эксплуатации располагаются источники звука, создается очень короткий звуковой импульс; ненаправленный микрофон, поставленный в точке наблюдения, принимает прямой и все следующие за ним отраженные импульсы. Наблюдение осуществляется с помощью осциллографа. Обработка осциллограмм, представляющих собою картины отражений, дает возможность определить амплитуду и время запаздывания достаточно большого числа ранних отражений с более или менее высокими уровнями. При этом целесообразно картину процесса нормировать по отношению к импульсу прямого звука.



Фиг. 1

Следует особо остановиться на выборе типа и источника измерительного сигнала. Выбор малой длительности звукового импульса определяется условием получения четкой картины отражений в любой точке зала, без взаимного перекрытия следующих друг за другом (с точностью различения интервалов до 1 *мсек*) эхо-сигналов. Важно также учесть при этом и постепенное, в процессе послезвучания, «расплывание» отраженных импульсов по длительности вследствие прогрессивного изменения их спектра. Наконец, выбор узких (и, следовательно, имеющих более широкий спектр) импульсов определяется необходимостью получения информации о «вкладе» в образование послезвучания возможно большей спектральной области в пределах звукового диапазона.

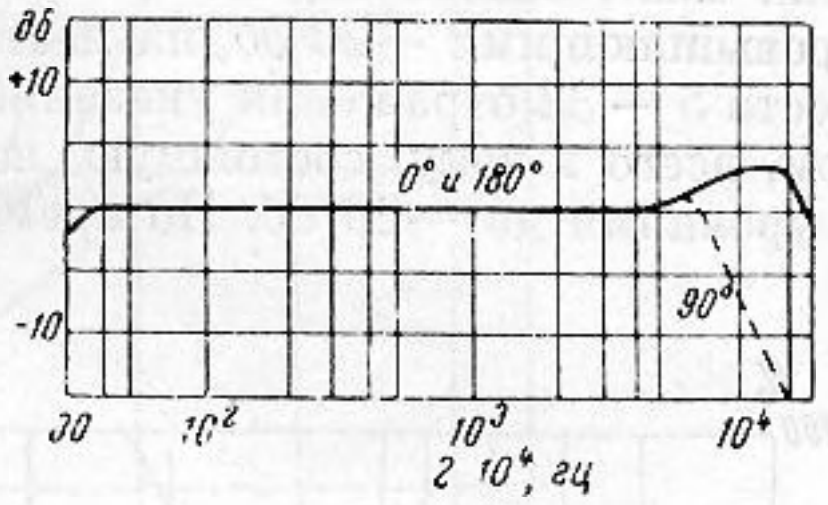
С учетом этих требований оказалось нецелесообразным использовать в качестве источника звука громкоговорители, обладающие, как правило, длительными переходными процессами, и провести сравнительное исследование параметров импульсов, получаемых с помощью искрового разряда и стартового пистолета ИЖ-СПЛ.

Искровой разряд осуществляется между вольфрамовыми электродами. Для получения не слишком малого отношения сигнал/шум на выходе микрофона, при измерениях в удаленных точках больших залов, емкость и напряжение заряда конденсатора искрового излучателя были выбраны равными соответственно 600 *мкф* и 400 *в*.

Несмотря на то, что импульс пистолетного выстрела, как показали результаты измерений, несколько больше растянут во времени по сравнению с импульсом искрового разряда (соответственно — около 0,22 и 0,12 *мсек*), спектр первого оказался сравнительно более равномерным в области от 50 до 18 000 *гц*. Так, сравнение спектров этих импульсов, проведенное с помощью спектрометра звуковых частот (27 треть-октавных полос в диапазоне от 50 до 23 000 *гц*), показало, что максимум спектральной плотности для искрового разряда находится в области более высоких частот (на фиг. 1 кривая *А* относится к спектру импульса пистолетного

выстрела, кривая *Б* — к искровому разряду; масштаб по оси ординат — в относительных единицах). Различие между обоими спектрами особенно заметно в диапазоне низких и средних частот. В спектре искрового разряда почти полностью отсутствуют низкочастотные составляющие до 500—700 *гц*. Длительность же пистолетного импульса и его характеристику направленности (неравномерность в пределах угла от 0 до 80° составляет $+1{,}5 \div 2$ *дб*, при направлении отверстием выхлопа* в сторону сцены) можно признать, вместе с тем, вполне удовлетворительными при проведении импульсных измерений.

В процессе сравнения обоих источников выявилось еще одно немаловажное преимущество пистолета,— а именно: лучшая воспроизводимость импульсов. Действительно, стабильность работы искрового разрядника оказывается зависящей от целого ряда «неуправляемых» (в процессе измерений) факторов: степени влажности воздуха в помещении, предшествующей ионизации воздуха, загрязнения электродов. Это и некоторые другие преимущества (компактность, удобство в работе и безопасность ввиду отсутствия высокого напряжения) стартового пистолета обусловили выбор его в качестве источника коротких звуковых импульсов**. Измерение давления, развиваемого при выстреле, показало, что на расстоянии 5 *м* от пистолета оно составляет 1350 *бар*.



Фиг. 2

С целью выбора подходящего числового показателя и исследования характерных свойств временнóй структуры процесса затухания звука были предприняты импульсные измерения в четырех залах различного назначения (оперный театр, концертный зал Филармонии, драматический театр, зал заседаний Института связи в г. Одессе). Было проведено подробное изучение картин отражений, получаемых с помощью измерительного ненаправленного конденсаторного микрофона типа УМ-57 в различных точках площади слушательских мест для каждого зала. На фиг. 2 показана частотная характеристика микрофона (при сферической характеристике направленности). Для наблюдения картин отражений и получения осциллограмм (будем в дальнейшем называть их рефлектограммами) использовался осциллограф С1-4 с фотоприставкой. Наличие нескольких скоростей ждущей развертки позволяло при необходимости растягивать или сжимать видимый на экране участок послезвучания.

Было получено свыше 2 000 рефлектограмм; обусловленная аппаратурой и последующей обработкой их погрешность результатов измерений была незначительной и обеспечивала измерение уровней отражений с точностью до 1 *дб* и определение времени их запаздываний с точностью до $1 \div 2$ *мсек*. Была обеспечена возможность учета отражений с уровнями до —20 *дб*. Время запаздывания отражений определялось с помощью шкалы, укрепленной на экране осциллографа и фотографируемой на пленку вместе с рефлектограммой.

Воспроизводимость результатов измерений контролировалась путем снятия рефлектограмм многократно в трех-четырех точках каждого зала. Конечно, статистические показатели могут быть получены только путем статистической обработки большого числа рефлектограмм, снятых для ряда

---

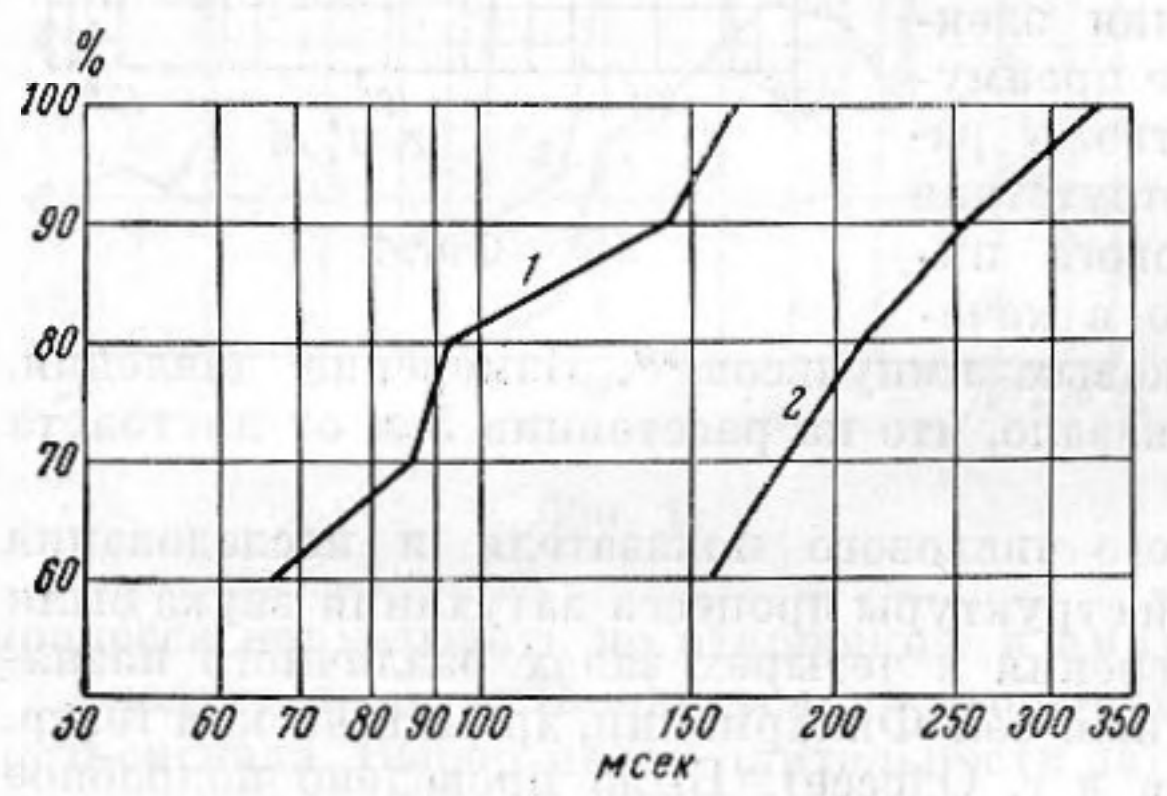
* В стартовом пистолете газы выходят через боковое отверстие, дуло в нем отсутствует.

** Следует здесь упомянуть предложенное Бургторфом [2] в качестве источника коротких звуковых импульсов (0,25 *мсек*) устройство, в котором под действием движущегося внутри трубки поршня создается избыточное давление, достаточное для разрыва бумаги на выходном отверстии трубки.

точек на некоторой ограниченной части площади слушательских мест, где различия в условиях непосредственного слухового восприятия не слишком заметны [3, 4].

В соответствии с полученными при обработке рефлектограмм результатами, одним из существенных показателей локальных параметров акустического сигнала оказалось время запаздывания некоторого процентного числа всех, попадающих в данную зону мест, отражений с уровнем до $-N$ *дб*.

Метод определения такого показателя может быть пояснен на следующем примере. Рассмотрим зону, состоящую из пяти слушательских мест. Пусть в результате обработки осциллограмм, относящихся к каждому из этих мест, оказалось, что на место 1 приходит 6 отражений с уровнями, превышающими —20 *дб*, на место 2 — 20, место 3 — 16, место 4 — 26 и на место 5 — 32 отражения указанного выше диапазона уровней. Таким образом, всего в зону, состоящую из пяти мест, поступило 100 отражений с уровнями до —20 *дб*. По времени запаздывания эти отражения распределились следующим образом:



Фиг. 3

место 1: 13—15—40—66—72—102 *мсек;*

место 2: 2—5—8—12—19—24—26—29—31 — 51 — 60 — 64 — 65—75—85—88—92—120—122—130 *мсек*;

место 3: 2—8—9—15—24 — 27 — 29—32—39—46—57 — 64 — 66 — 83 — 96 — 103 *мсек*;

место 4: 5—7—12—14—16 — 17 — 18—19 — 26 — 29 — 30 — 38—46—60—70—72 — 73 — 75—76—90—95—96 — 97 — 98 — 144 — 170 *мсек*;

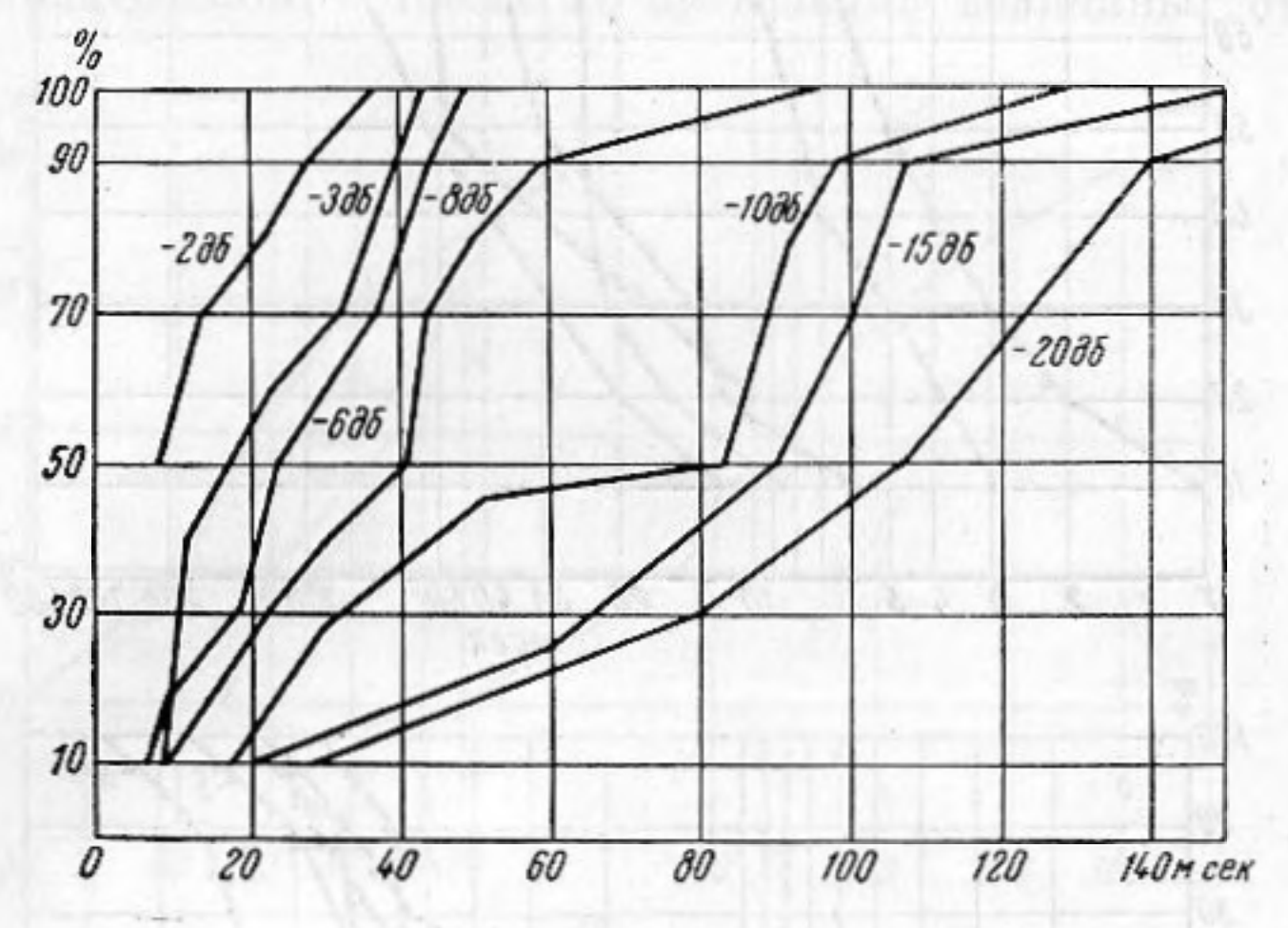
место 5: 3—5—18—19—23 — 25 — 26—37—43—46—47—57—60—62—70—74—75—80—83—92—96 — 101 — 106—110—117—119—120—123—128—131—136—141 *мсек*.

Предположим, требуется определить время запаздывания 90% отражений с уровнями до —20 *дб*, попадающих в зону этих пяти мест. Другими словами, необходимо узнать, в течение какого времени, протекшего после прихода прямого звука, в эту зону поступают первые 90% всех отражений с уровнями, превышающими —20 *дб*.

Расположив все 100 значений времени запаздывания в виде последовательности непрерывно возрастающих величин, начиная от самых малых (2 *мсек*) и кончая самым большим (170 *мсек*), мы и определим искомое Δt (90%, —20 *дб*).

На фиг. 3 представлено процентное число n% эхо-сигналов с уровнем до —12 *дб*, запаздывание которых не превышает величины, отложенной по оси абсцисс. Кривая *1* относится к зоне 23 мест, обследованных в середине партера (с 15 по 20 ряд) концертного зала Филармонии, кривая *2* — к зоне 25 мест на балконе этого же зала. Существенная разница во времени запаздывания, которую нетрудно заметить для каждой пары одинаковых значений n_i%, свидетельствует о том, что структура дискретных отражений в местах на балконе шире растянута по времени, чем в зоне партера. Имея в виду средние значения на фиг. 4 по соответственным зонам, можно, например, сказать, что 80% общего числа отражений с уровнем до —12 *дб* приходят в середину партера с запаздыванием не более 90 *мсек*, тогда как на балконе оно возрастает примерно до 210 *мсек*.

Такая же картина изменения степени растянутости временнóй структуры отражений сравнительно высокого уровня наблюдается и при сравнении различных групп мест в пределах каждого из обследованных залов. Характерными при этом также оказываются в пределах отдельных зон различия для групп отражений разного диапазона уровней. Примеры такого распределения приведены на диаграмме фиг. 4, где параметром на кривых

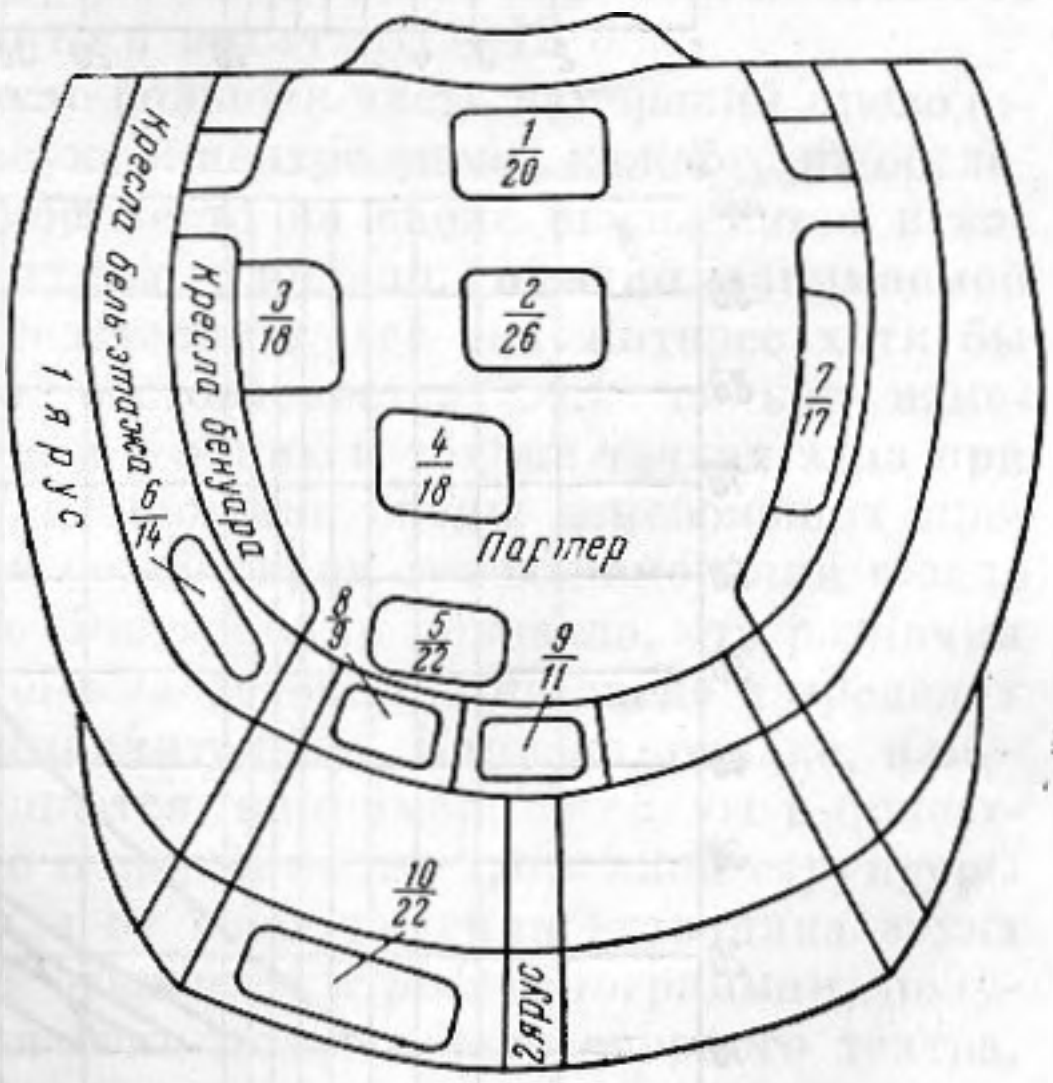


Фиг. 4

является нижняя граница диапазонов уровней для групп отражений, попадающих в область шести последних рядов партера драматического театра.

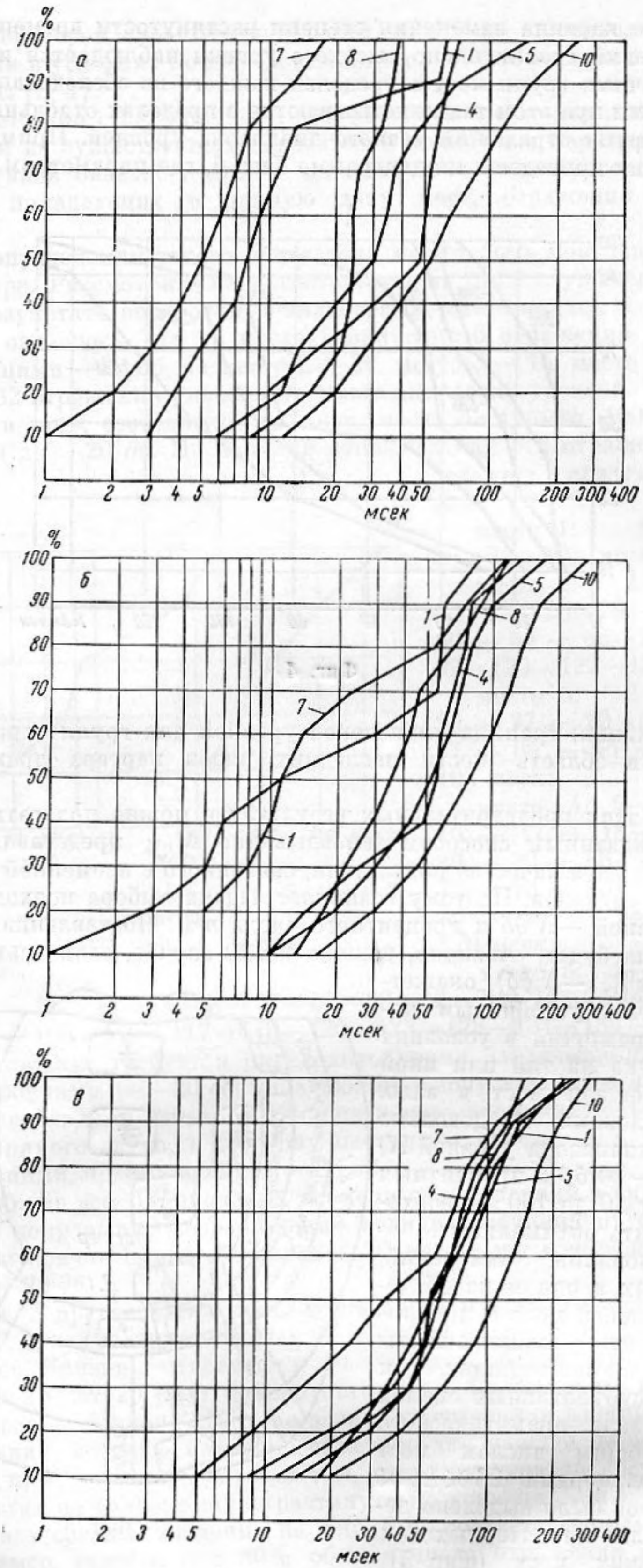
В свете этих предварительных результатов можно полагать, что определенное указанным способом запаздывание $\Delta t_{n\%}$ представляет определенный интерес в качестве показателя, связанного с временнóй структурой ранних эхо-сигналов. Поэтому возникает задача выбора подходящего диапазона уровней $-N$ *дб* и процентного числа $n\%$. Поставленная таким образом задача будет, очевидно, решена в том случае, если время запаздывания $\Delta t(n\%, -N$ *дб*$)$ окажется достаточно устойчивым показателем различий в условиях приема звука на той или иной области площади мест в зале. Другими словами, из довольно широкого диапазона уровней N_i от -3 до -20 *дб* и процентных чисел n_i от 10 до 100% необходимо выявить оптимальные.

На основании измерений, проведенных в одном из обследованных залов, можно приближенно оценить возможности выбора наиболее подходящих N_i и n_i. Путем субъективных оценок на плане зала драматического театра с общим числом мест 1 147 и размерами $26 \times 21 \times 18$ метров было выделено десять наиболее характерных зон слушательских мест (фиг. 5).



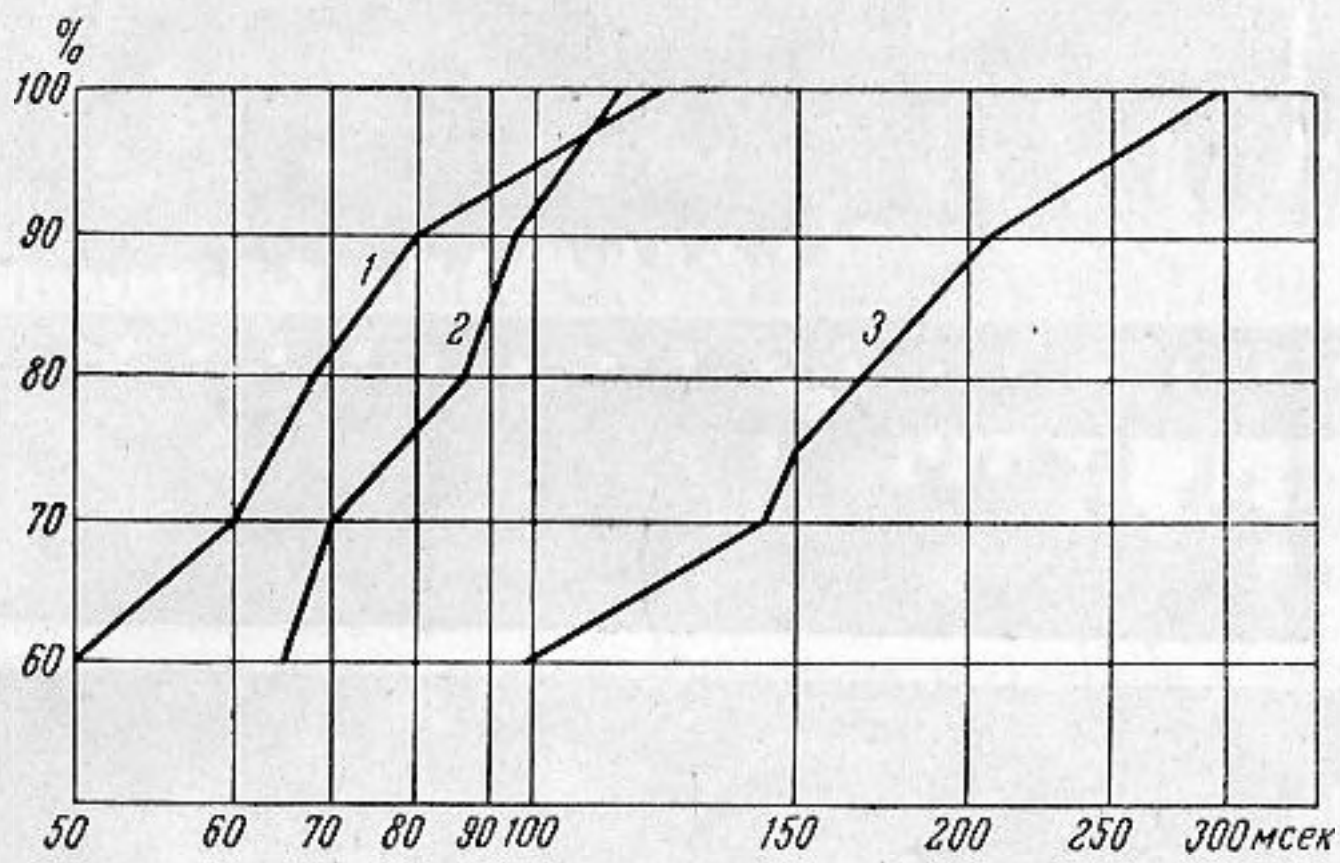
Фиг. 5

Числитель дроби внутри каждой зоны на фигуре означает порядковый номер, знаменатель — число обследованных мест в пределах этой зоны.


%
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
а
7
8
1
5
10
4
1 2 3 4 5 10 20 30 40 50 100 200 300 400
мсек
б
1
8
5
10
4
7
1
в
10
7
1
8
5
4

Фиг. 6

Подробное рассмотрение результатов статистической обработки рефлектограмм, относящихся к каждой из показанных на фиг. 5 зон, выходит за рамки рассматриваемых здесь вопросов. Существенно лишь отметить, что оказалось целесообразным ограничить исследуемый диапазон уровней значениями от —6 до —12 *дб*. Приведенные на фигурах 6, *а*, *б*, *в* графики зависимости процентного числа эхо-сигналов до —10 *дб*(*а*), —15 *дб*(*б*) и —20 *дб*(*в*), запаздывание которых не превышает величины, отложенной

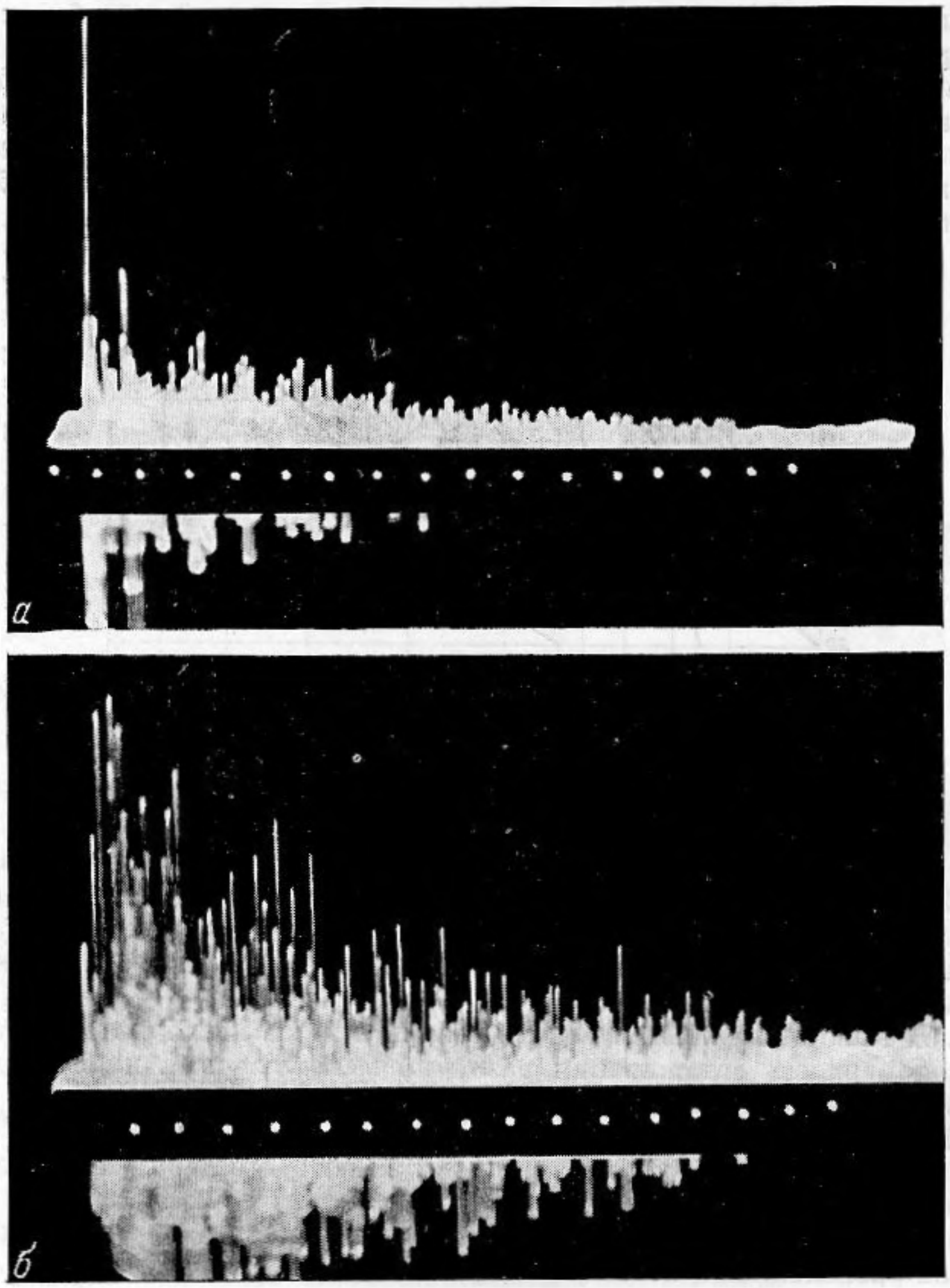


Фиг. 7

по оси абсцисс, подтверждают этот вывод. Действительно, различия во временной структуре, обнаруживаемые для зон с явно различными условиями приема звука (номер зоны является параметром отдельных кривых на приводимых графиках), все более сглаживаются по мере перехода от —10 *дб* к более широким диапазонам.

Такой вывод не является неожиданным, а лишь наглядно иллюстрирует закономерность сглаживания различий между зонами и перехода, по мере расширения диапазона уровней, от локального к более общему показателю для помещения в целом, а именно — времени реверберации. Нижней границей диапазона уровней, в пределах которого искомый показатель остается еще локальным, можно считать величину —12 *дб*.

В заключение следует отметить, что бóльшая часть измерений проводилась при расположении источника звука в центре сцены каждого из обследованных залов. Действительно, такое место на сцене оказывается в какой-то степени геометрическим центром площади, обычно занимаемой реальными источниками звука. Представляет все же интерес хотя бы качественная проверка следующего обстоятельства: как сильно изменяется временнáя структура отражений в одних и тех же точках зала при перемещении источника импульсов по площади сцены в небольших пределах. Сравнение рефлектограмм для целой серии таких измерений в зале оперного театра и в концертном зале Филармонии показало, что различия во временнóй структуре, при перемещении источника на сцене в пределах круга с радиусом порядка 3—6 *м*, незначительны. Картина, однако, изменяется, если источник звука перемещается, например, со сцены в оркестровую яму. Некоторое представление о зависимости временной структуры отражений в определенном месте зала от расположения источника звука дает график на фиг. 7. Кривые *1* и *2* относятся к рефлектограммам, полученным на местах центральной ложи бель-этажа в зале оперного театра, при расположении источника звука в двух разных местах сцены, кривая *3* — при расположении источника в оркестровой яме. Одна из рефлектограмм, относящихся к первому случаю, показана на фиг. 8, *а*, ко второму — на фиг. 8, *б* (расстояние между соседними метками времени составляет 20 *мсек*).



Фиг. 8

То обстоятельство, что при игре оркестра, располагаемого в оркестровой яме, музыка звучит полнее и богаче, чем при игре на сцене, можно, видимо, объяснить более развитой и многообразной (в случае оркестровой ямы) картиной отражений высокого уровня.

В заключение автор выражает глубокую благодарность В. В. Фурдуеву за постановку задачи и руководство работой.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Фурдуев. Корреляционный критерий оптимума реверберации. Акуст. ж., 1957, 3, 1, 74, 80.
2. W. Burgtorf. Eine Schallquelle zur Erzeugung kurzzeitiger Impulse. Akust. Beihefte, 1957, 1, 325—328.
3. G. R. Schodder. Über die Verteilung der Energiereicheren Schallrückwürfe in Sälen. Acustica, 1956, 6, 445—465.
4. W. Junius. Raumakustische Untersuchungen mit neueren Messverfahren in der Liederhalle Stuttgart. Acustica, 1959, 9, 4, 289—303.

Одесский электротехнический институт связи

Поступила в редакцию 18 сентября 1964 г.