АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XI 1965 Вып. 4

УДК 534.833.532

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ ОБЛИЦОВОК

Л. А. Борисов

Экспериментально исследовано дополнительное, по сравнению с расчетным по общепринятым формулам, снижение уровней шума в закрытом помещении после акустической обработки его поверхностей. Установлено, что если до обработки помещения реверберация является экспоненциальной, а после размещения материала на одной из поверхностей наблюдается заметное отклонение от экспоненциального закона, то возможно получение дополнительного снижения уровня шума на 2—5 *дб* в зависимости от величины объема помещения и количества размещенного в нем звукопоглощающего материала.

Для борьбы с производственным шумом широкое применение находят звукопоглотители в виде облицовок, специальных экранирующих и звукопоглощающих конструкций или отдельных штучных поглотителей.

Принято считать [1], что снижение уровня шума в помещении, достигаемое после акустической обработки его стен, определяется отношением количества единиц звукопоглощения, внесенного в помещение к уже имевшемуся количеству единиц звукопоглощения: $\Delta L = 10 \lg (A_1 / A_0)$. Однако при этом молча принимается, что поле в исследуемом помещении достаточно диффузно. Одним из признаков достаточной диффузности поля является прямолинейность (в масштабе децибел) кривых спадания уровня реверберации [2]. При внесении в реверберирующее помещение звукопоглощающего материала характер кривых спада может стать существенно отличным от экспоненциального [3]. Теоретический анализ неэкспоненциальной реверберации, основанный на волновой теории стационарного акустического режима в закрытых помещениях [4], показал, что если в результате акустической обработки реверберация становится неэкспоненциальной, то достигаемое снижение уровня шума может существенно превышать ожидаемое на основании элементарной теории.

Непосредственное обнаружение неэкспоненциального характера кривых реверберации затруднительно, т. к. отклонение хода записей уровня от экспоненциального закона имеет место в начальной стадии процесса и часто маскируется случайными флюктуациями, обусловленными интерференционными явлениями. Исследование процесса реверберации на моделях [5] показало, что величина кривизны записей уровня связана со степенью диффузности звукового поля соотношением обратной пропорциональности. Именно наличие этой связи позволяет в известной мере судить об отклонении процесса реверберации от экспоненциального по достигаемой в помещении степени диффузности поля.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментального исследования эффективности звукопоглощающих облицовок в шести реверберационных камерах, объемами от 100 до 300 $м^3$. Реверберационные камеры в качестве опытных помещений были выбраны на основании установленного Фурдуевым [4] условия достижения максимального

дополнительного снижения уровня шума в помещении после акустической обработки его поверхностей.

Звуковое давление p в некоторой точке помещения в стационарном режиме вынужденных колебаний при работе точечного источника можно представить в виде разложения по фундаментальным функциям. Вычисляя среднее значение квадрата звукового давления по объему помещения V и по некоторой области частот (от w_1 до w_2), занимаемой спектром шумового сигнала, и находя статистическое среднее значение этой величины $|p_{\text{см}}{}^2|$, не зависящее от положения источника в помещении, получаем формулу

$$|p_{\text{ст}}{}^2| = \rho c^2 \frac{P}{13{,}8V} \cdot \frac{\sum\limits_{\Delta N} T_n}{\Delta N_\infty}, \qquad (1)$$

где P — акустическая мощность точечного источника в полосе частот $\omega_2 - \omega_1$, T_n — время реверберации n-го собственного колебания, ΔN — общее число собственных колебаний, ΔN_∞ — число собственных колебаний, соответствующих косым волнам (наиболее быстро затухающим).

Переходя к средней плотности звуковой энергии, имеем

$$\varepsilon = \frac{p_{\text{ст}}{}^2}{\rho c^2} = \frac{P}{13{,}8 \cdot V} \cdot \frac{\sum\limits_{\Delta N} T_n}{\Delta N_\infty}. \qquad (2)$$

Если процесс реверберации в помещении не следует экспоненциальному закону, то величины T_n отличаются друг от друга. Обозначим через T время реверберации, определяемое обычным путем по постоянному наклону записи в более поздней части процесса и введем величину $\tau_n = T_n / T$. Тогда формула (2) примет вид

$$\varepsilon = \frac{PT}{13{,}8 \cdot V} \cdot \frac{\sum\limits_{\Delta N} \tau_n}{\Delta N_\infty}. \qquad (3)$$

Вводя среднее значение $\bar{\tau}$, определяемое как $\bar{\tau} = 1 / \Delta N \sum\limits_{\Delta N} \tau_n$, перепишем формулу (3) в виде

$$\varepsilon = \bar{\tau} \frac{PT}{13{,}8 \cdot V} \cdot \frac{\Delta N}{\Delta N_\infty}. \qquad (4)$$

Снижение уровня шума, достигаемое путем акустической обработки помещения, получается в следующем виде:

$$\Delta L = 10 \lg \frac{T_0}{T_1} + 10 \lg \frac{\bar{\tau}_0}{\bar{\tau}_1}. \qquad (5)$$

Величины τ_n связаны с показателями затухания собственных колебаний соотношением обратной пропорциональности. В результате акустической обработки помещения происходит перераспределение этих показателей, а следовательно, и величин τ_n. В случае благоприятного перераспределения τ_n, когда бóльшая часть звуковой энергии приходится на долю собственных колебаний с бóльшими показателями затухания, среднее значение $\bar{\tau}_1$ уменьшается и ΔL превышает значения, вычисленные по обычным формулам статистической теории реверберации.

Поскольку $\tau_n \leqslant 1$, то условие максимального снижения шума получается при $\bar{\tau}_0 = 1$ (процесс реверберации в помещении до его акустической обработки следует экспоненциальному закону) и $\bar{\tau}_1 < 1$. Чем сильнее неравенство $\bar{\tau}_1 < 1$, тем больше достигаемый эффект.

Эти условия наиболее полно осуществляются в камерах неправильной формы и с высокой отражательной способностью ограничивающих поверхностей. Все использованные для опытов камеры в большей или меньшей степени отвечали этим требованиям.

В качестве источника звука применялся многогранник с вмонтированными в него 13-ю громкоговорителями, оси которых были ориентированы таким образом, чтобы во всех направлениях источник посылал примерно одинаковое количество звуковой энергии. Тем самым были приняты меры для создания ненаправленного источника звука. Питание источника осуществлялось от усилителя мощности, на вход которого подавалось напряжение от генератора «белого» шума через октавный фильтр. Контроль постоянства подводимой к излучателю электрической мощности осуществлялся с помощью вольтметра и амперметра на выходе оконечного усилителя. Акустическая мощность вычислялась при каждом опыте по формулам работы [6] и практически не изменялась.

Приемный электроакустический тракт состоял из конденсаторного микрофона, спектрометра и регистратора уровня и позволял производить спектральный анализ шума в $^1/_3$ октавных полосах. Рабочие частоты, в зависимости от объема камеры и выбранного типа звукопоглотителя, лежали в диапазоне от 250 до 6500 *гц*.

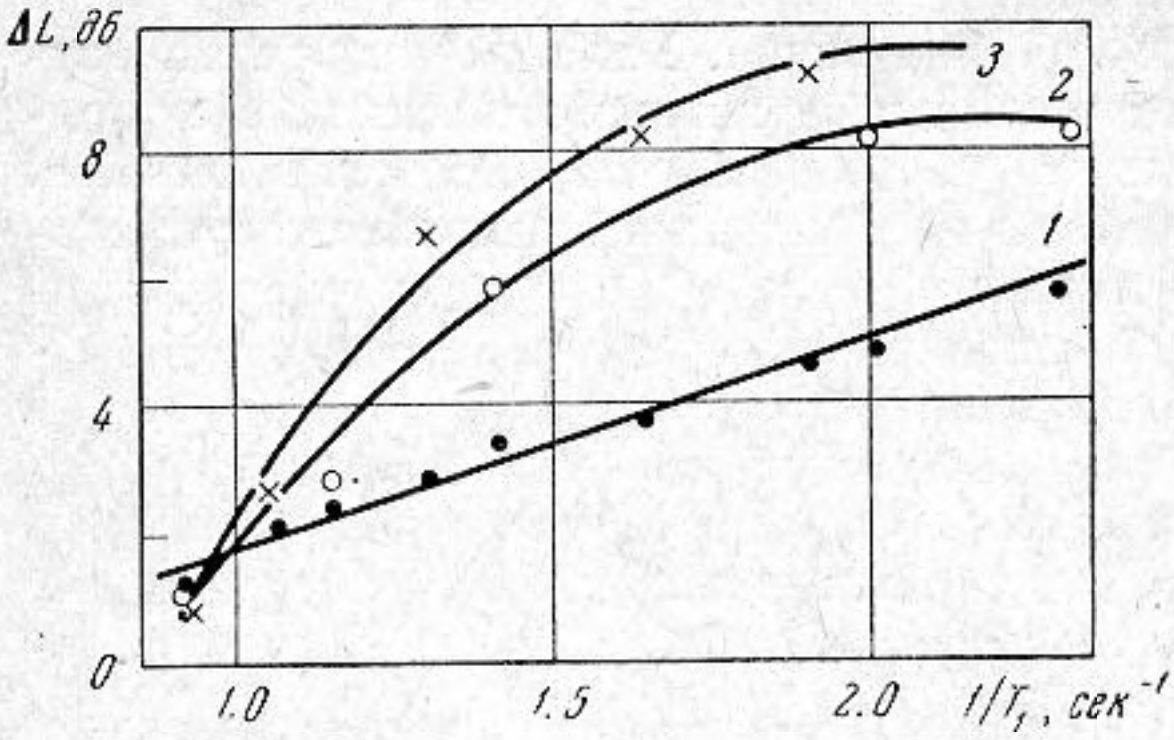
Излучатель устанавливался в одном из углов камеры. Определялась средняя величина уровня звукового давления путем измерения в нескольких точках камеры, причем приемный микрофон устанавливался в 3—4 *м* от излучателя с тем, чтобы доля прямого звука, приходящего к микрофону непосредственно от источника, была значительно меньше доли диффузного звука. Эти измерения повторялись для всех камер перед началом и после окончания эксперимента. Количество точек, в которых производилось измерение уровней звукового давления, определялось размерами камеры, но во всех случаях оно было не меньше 5. Одновременно для тех же точек камер производилась запись процесса реверберации. После обработки экспериментальных данных обычным путем, по наклону записей в пределах от —5 до —35 *дб*, определялось среднее время реверберации.

В процессе эксперимента в камеру последовательно вносили определенное количество звукопоглощающего материала (плиты из минеральной ваты или листы пенополиуретана). Одно и то же количество материала размещалось сперва лишь на одной из стен камеры, а затем равномерно по всем поверхностям, ограничивающим объем камеры. В каждом случае определялись уровни звукового давления, время реверберации, а также и степень диффузности звукового поля в каждой октавной полосе методом направленного микрофона Фурдуева и Чен Туна [7].

Изменение времени реверберации позволяло оценивать величину дополнительного звукопоглощения в исследуемом помещении после очередного внесения туда звукопоглощающего материала. Прямое измерение величины этого звукопоглощения, к сожалению, невозможно. В лучшем случае ее можно определить расчетным путем по формулам Сэбина или Эйринга при известных объемах помещений. Поскольку основным параметром этих формул является величина, обратная времени реверберации $1/T$ *сек*$^{-1}$, то именно она, определяемая в процессе эксперимента, и могла служить количественной характеристикой среднего звукопоглощения в каждом случае.

Введение же такой количественной характеристики звукопоглощения было необходимо для сравнения результатов измерений снижения уровней шума при различном размещении звукопоглощающего материала, поскольку при равномерном его распределении по всем поверхностям помещения сказывается влияние краевых эффектов, увеличивающих коэффициент звукопоглощения, вследствие увеличения эффективной поверхности звукопоглощающего материала и явлений дифракции на небольших по величине кусках материала.

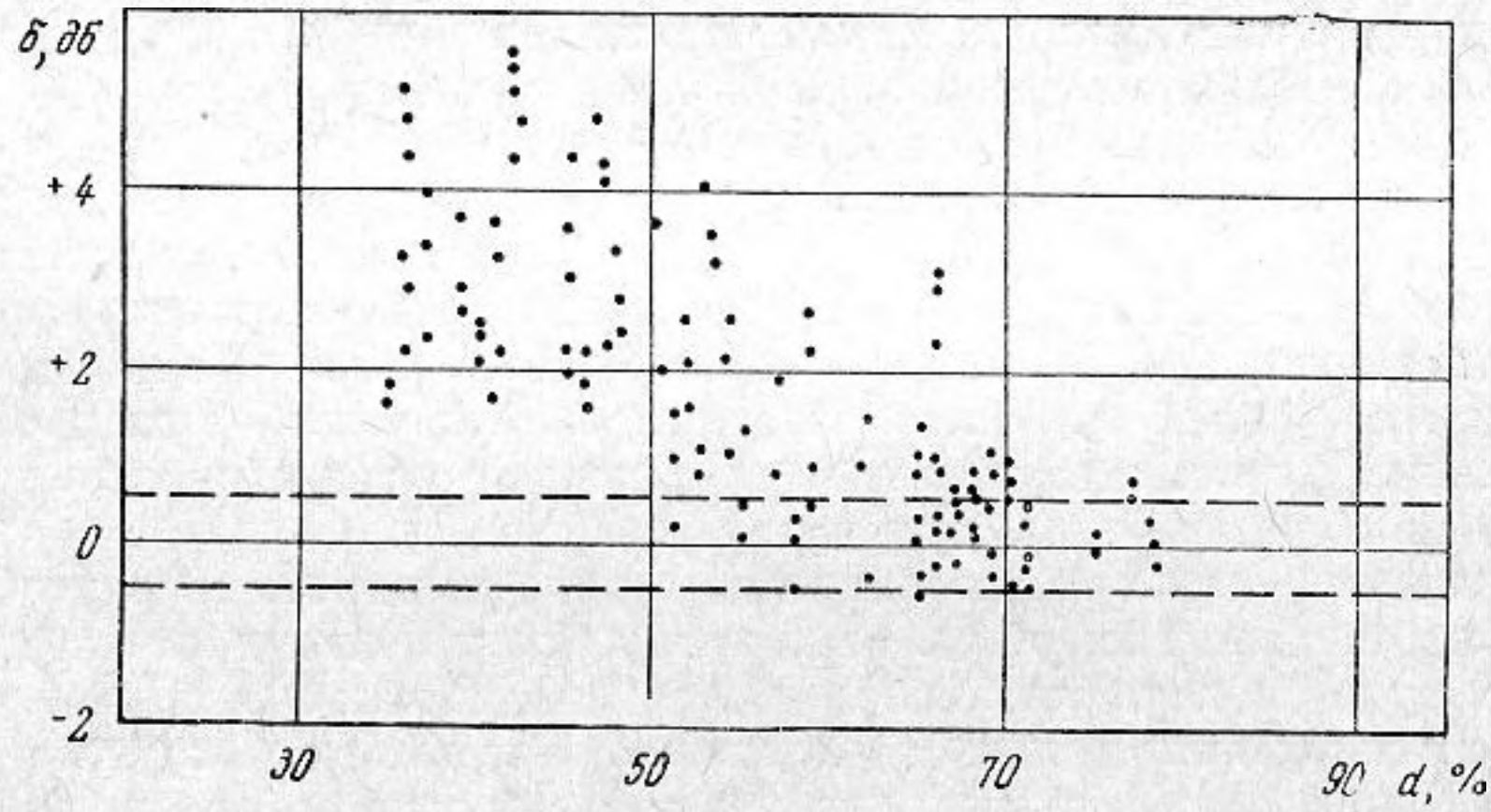
На фиг. 1 представлены результаты измерения снижения уровня шума в одной из реверберационных камер, объемом около 110 $м^3$ для частотной полосы 2400—4800 *гц*. По оси абсцисс отложены величины, обратные времени реверберации камеры, по оси ординат — разности уровней шума в пустой камере и после внесения туда звукопоглощающего материала. Прямая *1* построена по точкам, вычисленным по общепринятой формуле эффективности акустической облицовки: $10 \lg (T_0 / T_1)$, где T_0 — время реверберации пустой камеры, T_1 — после заполнения ее звукопоглощающим материалом. Кривые *2* и *3* проведены по экспериментальным точкам; каждая из последних отвечает среднему из 15 измерений в данной октавной полосе. Кривая *2* относится к случаю равномерного распределения материала, кривая *3* — к размещению того же количества материала на полу камеры.



Фиг. 1

При небольших количествах звукопоглощающего материала экспериментальные точки на всех трех кривых лежат близко друг к другу. В пределах ошибки эксперимента они совпадают. Степень диффузности в этом случае также не изменяется, оставаясь примерно той же, что и для незаполненных камер.

Увеличение общего количества звукопоглощающего материала приводит к заметному снижению степени диффузности поля и существенному



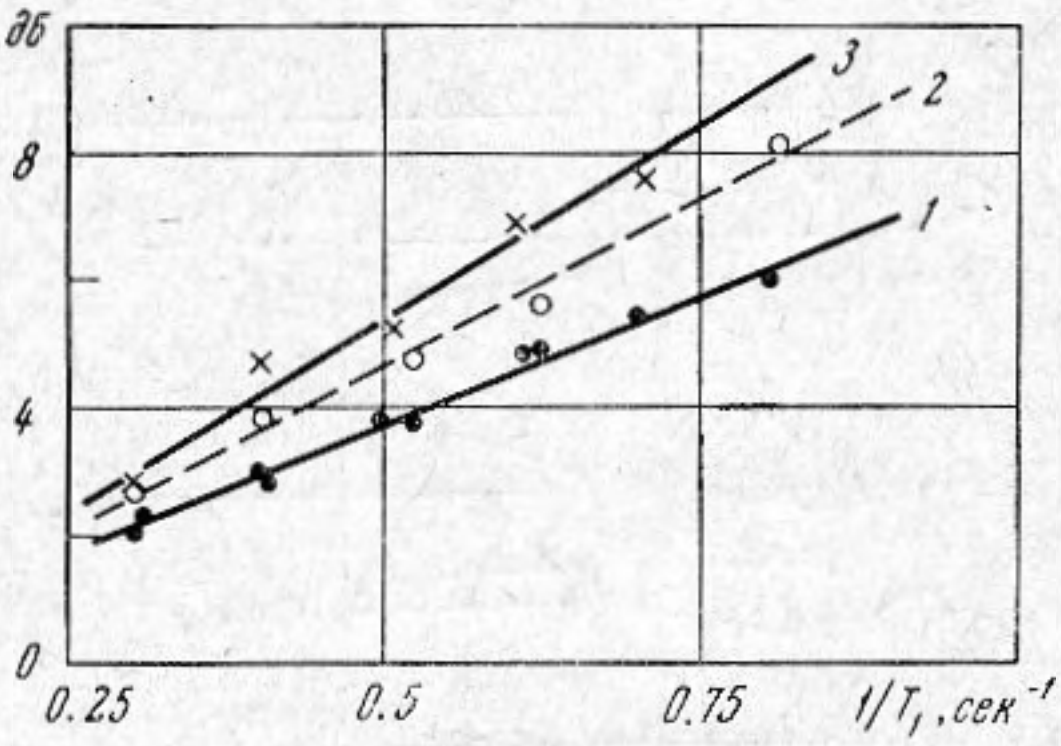
Фиг. 2

отклонению обеих кривых от прямой *1*. В отдельных случаях это отклонение достигает 4—5 *дб*. О зависимости этого отклонения от диффузности поля говорит и тот факт, что при сосредоточенном размещении материала отклонение экспериментально полученной величины ΔL от расчетной значительно больше, чем в случае равномерного распределения материала, т. к. в первом случае происходит более значительное нарушение диффузности поля, т. е. отклонение процесса реверберации от экспоненциального хода.

Исследование диффузности поля в камерах с внесенными звукопоглощающими материалами позволило получить представление о зависимости величины отклонения δ, определяемой как $\delta = \Delta L - 10 \lg (T_0 / T_1)$, от

степени диффузности поля. Результаты этих опытов в четырех камерах с объемами, не превышающими 200 $м^3$, представлены на фиг. 2. Здесь по оси абсцисс отложена степень диффузности поля в процентах, по оси ординат — величина δ. Величина δ является знакопеременной как вследствие естественного разброса значений уровней звукового давления, так и вследствие отклонения величины ΔL вниз от прямой $10 \lg (T_0 / T_1)$ при неблагоприятном распределении коэффициентов затухания собственных колебаний, возбуждаемых в помещении [4].

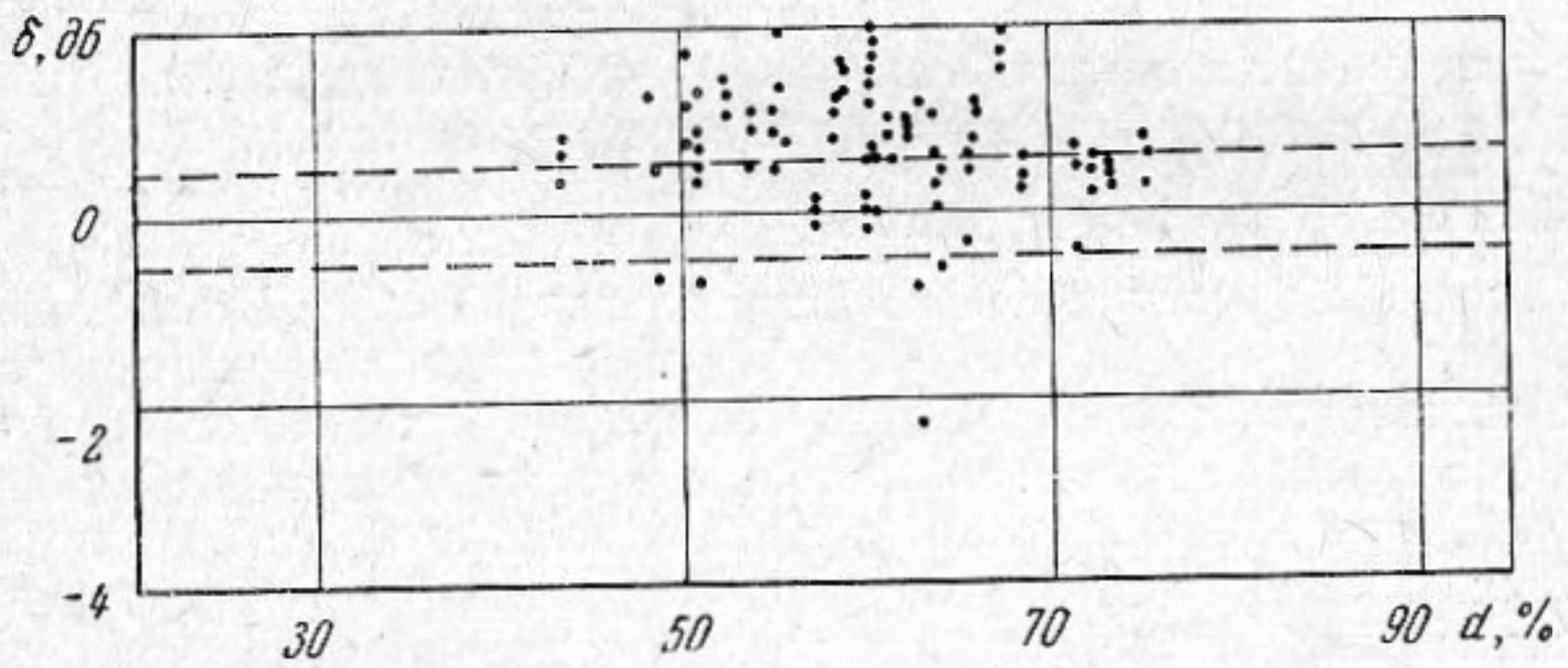
Из фиг. 2 видно, что при небольших нарушениях диффузности поля эти отклонения возможны как в ту, так и в другую сторону; при существенном нарушении диффузности эти отклонения становятся большими по величине и только положительными по знаку.



Фиг. 3

Аналогичные измерения в камерах большего размера (объемом от 250 до 300 $м^3$) показали, что при размещении звукопоглощающего материала на одной из стен камер также имеет место определенный положительный эффект в смысле снижения уровня шума. Однако оказалось, что величина его в этом случае существенно меньше, чем в предыдущем. Кривые зависимости величины снижения уровня ΔL от обратной величины времени реверберации представлены на фиг. 3, где кривые аналогичны кривым фиг. 1.

Характерно, что и здесь отмечается различие в величинах ΔL в зависимости от способа размещения материала, хотя оно и не такое большое, как для камер меньшего объема. Самым существенным результатом этих измерений является то, что δ достигает значений, не превосходящих 2 *дб* во всем диапазоне частот от 250 до 6500 *гц*. Зависимость δ от степени диффузности поля для данного случая представлена на фиг. 4.

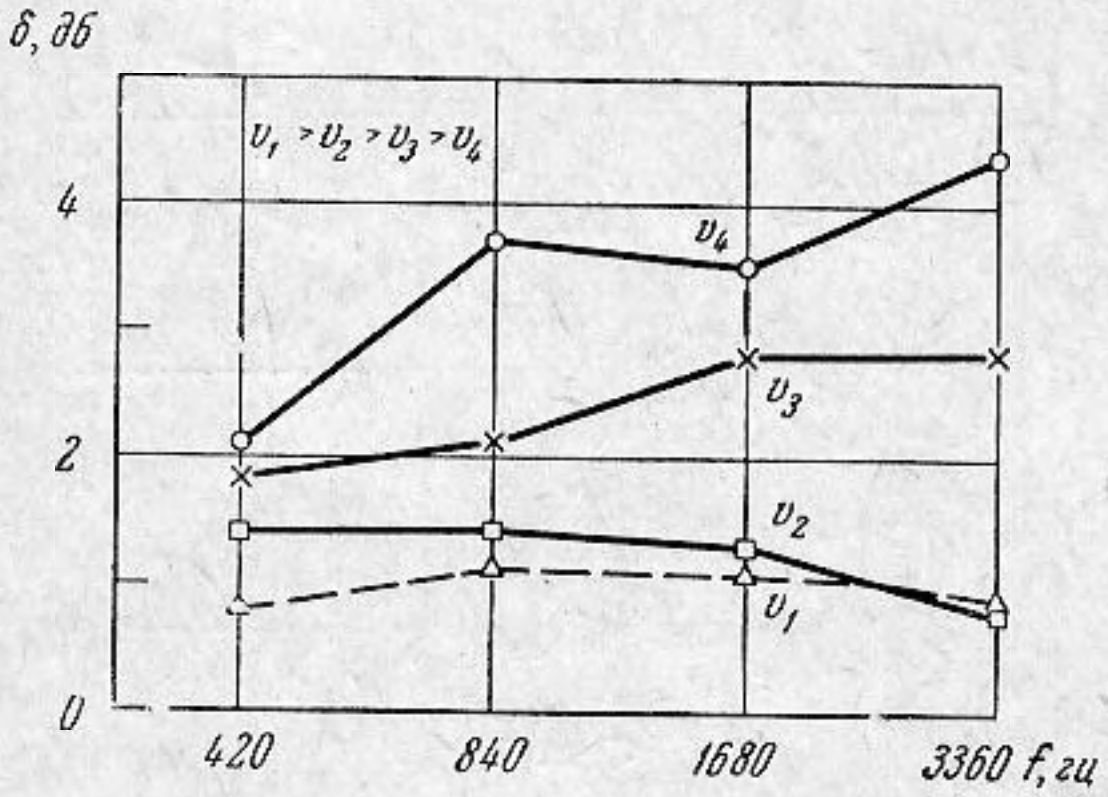


Фиг. 4

Уменьшение величины дополнительного снижения уровня шума в камерах большого объема может быть объяснено двумя причинами: влиянием изменения объема камеры и размеров ее отражающих поверхностей и начальным состоянием звукового поля в камере. В камерах большого объема размеры поверхности, не занятой звукопоглощающим материалом, таковы, что рассеяние звуковой энергии остается достаточно высоким и резкого нарушения диффузности поля не происходит.

Для определения влияния величины свободной поверхности камер на снижение уровня шума в четырех камерах различного объема были проведены сравнительные измерения с одним и тем же количеством звукопоглощающего материала из листов пенополиуретана общей площадью около 30 $м^2$. Материал укладывался только на полу камер с целью получения наибольших значений δ. Частотная зависимость величины δ для каждой из камер представлена на фиг. 5, где по оси ординат отложены, как и прежде, величины δ, а по оси абсцисс — средние частоты октавных полос.

Для всех частот влияние объема v_n помещения оказывается одинаковым: увеличение объема ведет к уменьшению величины дополнительного снижения уровня шума. Эти результаты подтверждают существование зависимости дополнительного снижения уровня шума от величины рассеивающей поверхности, не занятой материалом, т. е. от степени нарушения однородности звукового поля в помещении.



Фиг. 5

Следует отметить, что существенное влияние на величину дополнительного снижения уровня шума оказывает к тому же и форма помещения, которую можно характеризовать отношением максимального размера площади пола к высоте помещения. Для камер с относительно небольшой высотой (3—3,5 *м*) величина δ достигает максимальных значений (4—4,5 *дб*), в то время как для камер с высотой, превышающей 5 *м*, при том же количестве внесенного звукопоглотителя, δ достигает лишь 1,5—2,0 *дб*. Этот результат становится понятным при рассмотрении величины акустического отношения в точках, где производились измерения уровня шума. Акустическая обработка ограничивающих поверхностей помещения приводит к поглощению только диффузной части звуковой энергии и не оказывает влияния на интенсивность прямого звука. При одинаковом и достаточно большом удалении приемного микрофона от источника в том и другом необработанном помещении доля прямой энергии, падающей на микрофон, невелика. После акустической обработки интенсивность прямого звука не изменяется, но диффузная часть энергии в помещении малой высоты, вследствие большего числа отражений звука от обработанных поверхностей, ослабляется больше, чем в помещении большей высоты. Это и приводит к дополнительному различию в величинах δ для помещений различных объемов.

Сравнительный анализ результатов, представленных на фиг. 2 и 4, подтверждает правильность теоретических выводов о влиянии начального состояния поля камер на величину снижения уровня шума. Действительно, в первом случае (в камерах небольшого объема) степень диффузности поля камер до помещения туда звукопоглощающих материалов была достаточно высокой (в пределах от 80 до 95%), что позволяло считать процесс реверберации в этих камерах экспоненциальным. Во втором случае начальная степень диффузности была более низкой (от 65 до 75%). Это кажущееся противоречие обычным представлениям о связи диффузности поля с величиной объема помещения разрешается достаточно просто. В камерах небольшого объема высокая степень диффузности поля обеспечивалась наличием большого числа неровностей, ограничивающих объем поверхностей (в виде выступов и изломов), качественной обработкой этих поверхностей, неправильными формами самих камер и, кроме того, выбором нижней граничной частоты рабочего звукового диапазона. Большие же камеры имели

правильную форму и их поверхности не отличались столь высокой отражательной способностью, хотя звуковое поле в них было все же достаточно диффузным.

Результаты работы [5] говорят о появлении заметного искривления записей процесса реверберации при степени диффузности поля, меньшей 70%. Следовательно, во втором случае внесение в камеры звукопоглощающего материала вызывало меньшее относительное искривление записей реверберации, т. е. менее благоприятное распределение звуковой энергии между затухающими собственными колебаниями. Это и приводит к тому, что более значительная, чем в первом случае, часть звуковой энергии поля приходится на долю собственных колебаний с меньшими показателями затухания, что в конечном счете и определяет величину эффекта дополнительного снижения уровня шума.

Сопоставляя полученные результаты экспериментального исследования акустически обработанных помещений, можно сделать следующие заключения.

Снижение уровня шума в помещении после акустической обработки ограничивающих его поверхностей может превзойти значение, рассчитанное на основании известных формул статистической теории архитектурной акустики. Оптимальный эффект получается, когда процесс реверберации, до обработки помещения практически не отличавшийся от экспоненциального, в результате обработки перестает следовать экспоненциальному закону. Величина дополнительного снижения шума зависит от способа размещения звукопоглощающего материала: при сосредоточенном размещении его эта величина получается большей.

Форма и объем помещения оказывают влияние на величину дополнительного снижения шума. В невысоких помещениях эффект получается бóльшим, чем в высоких. В помещениях большого объема величина дополнительного снижения шума зависит не только от количества размещенного звукопоглощающего материала, но и от величины оставшейся не обработанной поверхности помещения.

Автор выражает благодарность В. В. Фурдуеву за руководство работой.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Ц е л л е р. Техника борьбы с шумом. М., Госстройиздат, 1958.
2. Ф. М о р з. Колебания и звук. М.— Л., Гостехиздат, 1949.
3. H. K u t t r u f f. Eigenschaften und Auswertung von Nachhallkurven. Acustica, 1958, **AB1**, 273—280.
4. В. В. Ф у р д у е в. Снижение шума при акустической обработке шумных помещений. Акуст. ж., 1965, **11**, 4, 481—486.
5. E. M e y e r, H. K u t t r u f f, H. D. G r u s c h k a. Model versuche zu Schallrichtungsdiffusität und Nachhallvorgang. Acustica, 1963, **13**, **AB1**, 187—193.
6. R. J. W e l l s, F. M. W i e n e r. On the determination of the acoustic power of sourse of sound in semireverberant spaces. Noise Control, 1961, 7, 1.
7. В. В. Ф у р д у е в, Ч е н Т у н. Измерение диффузности звукового поля в помещениях методом направленного микрофона. Акуст. ж., 1960, **6**, 1, 107—119.

Н.-и. институт строительной физики
Москва

Поступила в редакцию
4 августа 1964 г.