

ШУМ И СПОСОБЫ ЕГО ИЗМЕРЕНИЯ *

Г. В. Кэй, Лондон

Борьба с шумами представляет выдающийся интерес с самых разнообразных точек зрения — начиная от благоустройства городов и кончая проблемами обороны. Печатаемая ниже статья принадлежит директору Национальной физической лаборатории в Теддингтоне (близ Лондона) Г. Кэйю. Хотя автор оперирует исключительно с примерами из жизни Англии и Америки и уделяет недостаточно внимания шумам, связанным с различными видами производств, — статья его представляет большой интерес как очень полная и ясно изложенная сводка современного состояния физики шумов.
Ред.

ОБЛАСТЬ СЛЫШИМОСТИ

Как и во многих других отраслях науки, в области акустических исследований современная точность и простота измерений связана с развитием электрических методов измерения. Ключ к использованию этих методов дало изобретение катодной лампы: именно ей техническая акустика обязана стремительностью своего надолго задержавшегося развития.

Прежде чем перейти к вопросу о способах измерения шумов, вспомним основные физические факты, касающиеся слуха, так как поскольку дело касается шумов, слуховое восприятие является последним критерием. В основе изучения слуха лежат опыты с чистыми тонами. Здесь мы должны отметить, что нашими познаниями в области слуха и речи мы в значительной мере обязаны замечательным

* Supplement to Nature, № 3224, p. 253, 1931.

исследованиям Гарвея Флетчера и его сотрудников, а также трудам телефонных лабораторий Бэлла в Нью-Йорке.

Что касается частоты, то среднее ухо воспринимает как звук колебания, частоты которых охватывают диапазон от 20 до 20 000 герц, причем верхняя граница слышимости с возрастом понижается. В различных вопросах прикладной акустики интерес представляет значительно более узкий диапазон частот, — от 50 до 5000 герц для речи и от 35 до 7000 герц для музыки.

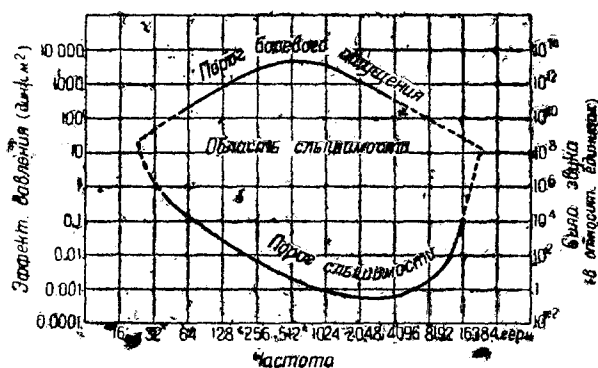


Рис. 1.

Что касается силы звука, то, как было показано Вегелем и другими на основании опытов с чистыми тонами, для каждой частоты существует известная минимальная амплитуда, ниже которой среднее ухо перестает воспринимать звук. При этом ухо значительно более чувствительно в области средних частот, чем к высоким и низким тонам. В самом деле, при непрерывном изменении частот порог или нижняя граница слышимости проходит через минимум около 2000 герц.

Точно так же для каждой частоты существует максимальная амплитуда, выше которой ухо вместо звука воспринимает болезненное давление и даже сильную боль. И здесь ухо наилучшим образом функционирует в средней части диапазона слышимости (около 500 герц), где верхняя

граница слышимости (порог болевого ощущения) проходит через максимум при постепенном изменении частоты. На рис. 1 изображена область слухового восприятия среднего уха по данным Флетчера и Вегеля. Границы этой области образуются кривыми обоих порогов, пунктиром обозначены те части кривых, где точные измерения затруднительны. Мы видим, что область слышимости шире всего возле 1000 герц и что она значительно сужается к обоим концам музыкальной шкалы. Этот максимум соответствует диапазону интенсивностей, различающихся приблизительно в миллион миллионов раз, или диапазону звуковых давлений, различающихся в миллион раз, примерно от 0,0005 до 3000 *дин/см²*. Отметим, что для восприятия очень высоких и очень низких звуков интенсивность их должна быть очень велика и, что область слышимости здесь весьма сужена. Наглядной иллюстрацией к этому может служить звук 10-метровой органной трубы, который мы скорее чувствуем, чем слышим.

ВОСПРИЯТИЕ ПРИРОСТА СИЛЫ ЗВУКА И ЭФФЕКТ МАСКИРОВАНИЯ

Установлено, что нормальное ухо лишь в самых благоприятных условиях может уловить различие в 10% в силе двух чистых тонов средней громкости, звучащих попеременно без перерыва. Цифра эта увеличивается больше, чем вдвое, если два тона чередуются с небольшим интервалом, хотя бы в 0,5 сек. В обычных условиях, однако, наименьшее изменение уровня энергии, воспринимаемое нормальным ухом, в среднем — порядка 26% для звуков средних частот и интенсивностей. Число это увеличивается для слабых звуков и уменьшается для звуков очень сильных. Точно так же для очень высоких и очень низких тонов число это значительно больше, нежели в области средних частот.

Из того факта, что ухо ассоциирует ступени громкости не с абсолютными, а скорее с процентными приращениями силы звука, явствует, что в то время как ступени шкалы громкости растут в арифметической прогрессии, физиче-

ская сила звука растет в геометрической прогрессии; соотношение здесь таково же, как соотношение между числами и шкалой чисел на логарифмической линейке. Мы имеем здесь, следовательно, еще одну иллюстрацию закона Вебера-Фехнера, согласно которому физиологический эффект приблизительно пропорционален логарифму энергии, вызывающей соответствующее раздражение. Чтобы определить зависимость между силой звука и громкостью в различных областях частот, Кингсберри произвел ряд опытов по

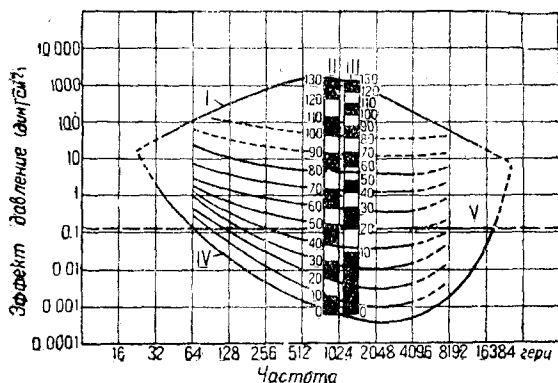


Рис. 2. I—порог болевого ощущения, II—шкала децибелов, III—шкала громкостей, IV—порог слышимости, V—кривые равной громкости.

различению силы чистых тонов. Эти опыты показывают, что для частот между примерно 700 и 4000 герц соотношение между громкостью и силой звука не зависит от частоты. Для тонов более низких с увеличением силы звука громкость возрастает пропорционально быстрее. Результаты Кингсберри представлены на рис. 2, на котором изображен ряд кривых равной громкости, расположенных внутри области слухового восприятия. Как видно из рисунка, эти кривые приблизительно параллельны друг другу в области средних частот выше 700 герц.

Иллюстрацией к кривым равной громкости может служить следующий эксперимент: если постепенно повышать частоту чистого тона постоянной силы, то будет слышно, что громкость пройдет через максимум около 2000 герц;

это станет очевидным, если можно на рис. 2 провести горизонтальную прямую на уровне приблизительно в $0,1 \text{ дин/см}^2$. Маскирующее действие одного чистого тона на другой обычно измеряется повышением порога слышимости маскируемого тона. В общем случае определенный тон маскируется лучше всего, во-первых, тоном приблизительно той же частоты; во-вторых, тоном более низким лучше, чем более высоким, — во всяком случае для громкостей, соответствующих разговорной речи и больших.

Не так просто обстоит дело с громкими сложными звуками, каковы, например, шумы, так как здесь суммарный эффект маскирования может быть осложнен другими факторами, например, маскированием отдельных индивидуальных компонент и образованием субъективных тонов (см. книгу „Речь и слух“ Флетчера).

ДЕЦИБЕЛ

Мы представляем себе теперь размеры области слухового восприятия; нам предстоит выбрать единицу, которая будет служить нам „метром“ или „градусом“. Надо постараться связать между собой громкость и силу или энергию звука; мы уже видели, что в то время как громкость увеличивается в арифметической прогрессии, энергия звука возрастает огромными скачками по шкале, имеющей чуть ли не астрономические размеры. Такое соотношение величин очень затрудняет измерения, и ясно поэтому, что действительно гораздо удобнее положить в основу измерения шкалу отношений энергий звука. Сходная потребность, возникшая в области телефонных измерений, была удовлетворена введением „бела“ — единицы, название которой было выбрано в честь изобретателя телефона Александра Грехема Белла. Один „бел“ выражает собой десятикратное возрастание мощности или энергии; иными словами, две интенсивности, относящиеся друг к другу, как $r:1$, отличаются друг от друга на $\lg_{10} r$ белов. Бел был затем принят и в качестве основной акустической единицы; впрочем, чаще употребляется „децибел“ ($дб$), так как бел — слишком боль-

шая единица для акустических целей. Таким образом мы получаем следующую табличку соотношений:

Отношение (r) интенсивностей	Число децибелов ($10 \lg_{10} r$)
1	0
10	10
100	20
1000	30
10 000	40
.
10^{13}	130

Следует отметить, что шкала децибелов не имеет под собой физиологической основы и целиком построена на измерении интенсивностей физическими методами. Тем не менее такая шкала имеет два преимущества: во-первых, она в первом приближении совпадает со шкалой субъективно воспринимаемых громкостей; во-вторых, как показывает опыт, децибел в выше приведенном определении приблизительно соответствует наименьшему ощутимому в обычных условиях изменению громкости (в области средних громкостей). В действительности ощутимый прирост громкости иногда оказывается несколько больше, а иногда несколько меньше децибела, изменяясь в пределах от 0,2 до 9 *дб*, в зависимости от частоты тона и его положения в области слухового восприятия.

Теперь мы уже в состоянии определить уровень громкости чистого тона определенной высоты в физических терминах. Нашим „градусом“ будет служить децибел, нашим „нулем“ — порог слышимости для данной частоты. Уровень громкости чистого тона может быть определен в согласии с вышесказанным, как интенсивность, выраженная в децибелах над порогом слышимости для данной частоты.

Опыт показывает, что для чистых тонов средней высоты вся область слухового восприятия от порога слышимости до болевого порога покрывается примерно 130 *дб*. Для высоких и низких тонов это число значительно меньше. Положение, однако, усложняется, если поставить более широкий вопрос о сравнении громкости чистых тонов различной вы-

соты. Мы сразу увидим, что при такой более широкой постановке вопроса нельзя установить простого соотношения между физической интенсивностью, и громкостью. Два чистых тона различной высоты, вообще говоря, не дают одинакового ощущения громкости, даже тогда, когда их физические интенсивности равны или в одинаковое число раз превышают интенсивности, соответствующие порогам слышимости, т. е. когда уровни громкости обоих тонов одинаковы.

Далее, если уровни двух чистых тонов различной высоты и равной громкости увеличить в одинаковое число раз, то тоны, вообще говоря, перестанут казаться одинаково громкими.

Таким образом для тонов различной высоты или для сложных звуков ни интенсивность, ни уровень ощущения не могут служить мерилom громкости. Для практических измерений приходится выбрать в качестве стандартной произвольную шкалу, причем наиболее удобной для этого является шкала громкостей чистого тона в области частот около 1000 герц. Тогда громкость любого простого или сложного звука (например шума), определяется как уровень ощущения (в децибелах над порогом слышимости) стандартного тона, воспринимаемого ухом как звук, одинаково громкий с данным. Отметим, что нулевая точка этой шкалы или порог слышимости для тона в 1000 герц соответствует давлению, примерно равному $0,001 \text{ дин/см}^2$.

Повторяем, что выбор этой стандартной шкалы произволен и что равные интервалы на шкале в общем не слишком близко совпадают с равным числом ступеней громкости. Например, приращение уровня от 0 до 10 *дб* на стандартной шкале приблизительно соответствует, едва заметному в обычных условиях приросту громкости, приращение от 50 до 60 *дб* соответствует 10 различным градациям, а прирост уровня от 100 до 110 *дб* — около 15. Иначе говоря, мы можем измерять диапазон интенсивностей, лежащих между обоими порогами, либо шкалой децибелов с равными интервалами, либо шкалой громкостей со ступенями вначале очень крупными, затем более отлогими, но зато соответствующими равномерному приросту громкости (рис. 2).

Прибавим, что при установлении практической шкалы громкостей можно допустить известную свободу выбора, так как в области средних частот (выше 700 герц) соотношение между громкостью и уровнем ощущения остается постоянным. Например, Национальная физическая лаборатория в большей части своих работ принимает за стандартный тон в 800 герц, а в Соединенных штатах широко применяется шкала со стандартным тоном в 1000 герц.

Речь и шум

Первостепенный интерес представляет собой маскирующее действие шумового фона на разговорную речь. Разговор становится затруднительным при шуме, достигающем 70—80 дб, а при 90 дб даже при громком крике разговор становится просто невозможным.

Напомним, что большая часть энергии человеческого голоса приходится на области низких частот. Около 60% энергии приходится на область ниже 500 герц и около 85% на область ниже 1000 герц. Известно, однако же, что внятность речи зависит главным образом от передачи высокочастотных согласных (примерно выше 1000 герц), а не от гласных, характеризующихся колебаниями низкой частоты (примерно 120 герц для мужского голоса и 240 герц для женского), несмотря на то, что низкочастотные компоненты заключают в себе главную часть энергии. Дэвис и Ивенс в Национальной физической лаборатории наблюдали, что разговаривать в закрытом помещении становится легче, если устранить высокочастотные шумы. К счастью, устранить высокие частоты гораздо легче, чем низкие; это особенно важно в том случае, когда стены помещения не могут быть сделаны достаточно массивными, например, стены кабины аэроплана. Далее, высокие частоты сильнее поглощаются звукопоглощающими материалами, укрепленными на внутренних стенках помещения.

Исследуя влияние шума на слышимость разговорной речи, Кнудсен в 1925 г. нашел, что если мешающий звук представляет собой чистый тон приблизительно той же гром-

кости, что и речь, то мешающее действие почти не зависит от частоты; при больших же интенсивностях, мешающее действие низких тонов больше, нежели высоких. Он же установил, что шум мешает сильнее, чем чистый тон любой высоты. Рис. 3 дает сводку (сделанную Флемингом) результатов Кнудсена по вопросу о влиянии посторонних шумов на внятность речи, измеряемую процентом артикуляции разговорной речи нормальной громкости (50 дб). Как видно из рисунка, даже слабый шум в значительной степени нарушает восприятие речи; шум же громкостью в 30—40 дб уменьшает внятность речи до недопустимых значений.

ШУМ И ВЫЗЫВАЕМОЕ ИМ РАЗДРАЖЕНИЕ

В последнее время был подвергнут экспериментальному исследованию вопрос о раздражении, вызываемом шумами. Точных измерений в этой области трудно и

ожидать, но ясно, что среди обуславливающих это явление факторов немалую роль играет частота и громкость. Что касается высоты, то вероятно на большинство людей пронзительные звуки действуют более раздражающе, чем низкие. Например, высокий тон автомобильного рожка с его стакато, столь обычный для парижских таксомоторов, более неприятен, чем низкий звук рожка, обычно применяемого в Англии. Это впечатление подтверждается работой Лэрда и Коя, которые нашли, что раздражающее действие является функцией громкости и высоты тона, причем высокие тона раздражают несравненно сильнее, чем низкие и средние, наиболее же неприятными являются высокие звуки большой громкости.

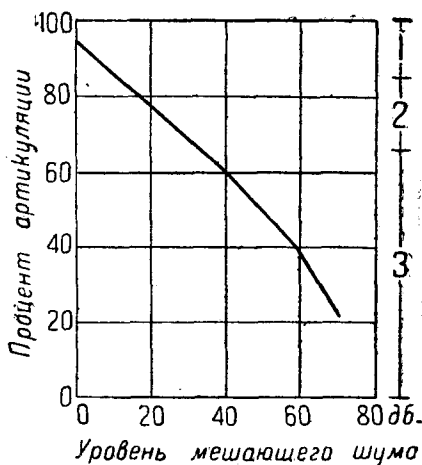


Рис. 3. 1 — хорошая слышимость, 2 — удовлетворительная слышимость (при внимательном слушании), 3 — неудовлетворительная слышимость.

Для тонов с частотой ниже 500 герц эффект раздражения зависит от громкости. В связи с этим интересно отметить, что область частот, характеризующих нормальную речь человека, повидимому, вызывает наименьшее раздражение его. Раздражающее действие некоторых теноровых голосов и сопрано по мнению Лэрда и Коя находится в согласии с их исследованиями.

Повидимому, неприятное ощущение, вызываемое сложными шумами, например автомобильным гудком, в значительной степени зависит не только непосредственно от громкости, но также от присутствия сильных высоких и негармонических компонент.

АБСОЛЮТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Стандартный метод измерения энергии волны в абсолютных мерах, вообще говоря, состоит в том, что волна поглощается каким-нибудь подходящим материалом и затем измеряется количество выделившегося тепла. Но даже, если бы можно было заставить звуковые волны полностью поглотиться, абсолютное количество энергии речи и большей части остальных обыденных звуков так мало, что находится на пределе возможности измерения с помощью наиболее чувствительных приборов. Например, средняя звуковая мощность разговорной речи равняется приблизительно $10 \mu W$. Для громкого крика мощность подымается до $1000 \mu W$, для тихого говора она спадает до $0,1 \mu W$, а для легкого шопота до $0,001 \mu W$. Для иллюстрации этих цифр приведем такой пример: стотысячная толпа на стадионе в Уимбли, говорящая непрерывно и громко, дала бы такую звуковую мощность, которая при обращении в тепло могла бы заставить светиться маленькую электрическую лампочку в течение всего состязания. Акустической энергии, затраченной до конца состязания, при превращении ее в тепловую, хватило бы на то, чтобы вскипятить чашку чая. Особенно возбужденно настроенная толпа, кричащая все время изо всех сил, могла бы вскипятить 10 чашек чая — количество, по-

жалуй, достаточное для того, чтобы наполнить призовой кубок.

Можно однако, найти одно — два акустических явления, связанных с излучением значительного количества энергии. Измерения над пароходными сиренами в Нью-Йорке показали мощность около $6 \text{ } \mu\text{W}/\text{см}^2$ на расстоянии 34,5 м, так что общее количество акустической энергии, излучаемой сиреной, получается равным приблизительно $1/3 \text{ л. с.}$

Ясно, однако, что для звуков обычной силы термические методы измерения акустической энергии абсолютно ничего не обещают, и мы должны обратиться к каким-нибудь иным свойствам звуковых волн: можно использовать колебания давления воздуха в проходящей звуковой волне, далее, связанные с ними небольшие колебания температуры и показателя преломления, скорость колеблющихся воздушных частиц или давление, производимое акустическим излучением на отражающую звук поверхность. Разговорная речь соответствует эффективному давлению примерно в $1 \text{ дин}/\text{см}^2$, * другими словами колебанию давления в одну миллионную часть атмосферы. Изменения показателя преломления для таких колебаний давления равняются примерно 10^{-9} , изменение температуры $0,001^\circ\text{C}$, скорость частиц примерно равна $1/40 \text{ см}/\text{сек}$, а давление звукового излучения составляет только несколько 10^{-1} долей атмосферы. Соответствующая мощность равняется приблизительно $0,001 \text{ } \mu\text{W}/\text{см}^2$; напомним, что мощность (или энергия) изменяется пропорционально квадрату давления и амплитуды.

Для осуществления абсолютных измерений мы должны избрать такой измерительный прибор, показания которого не зависели бы от частоты и формы звуковой волны. Одним из наиболее подходящих приборов является диск Релэя, с помощью которого измеряется скорость воздушных частиц. Однако, это очень хрупкий инструмент, который следует рассматривать прежде всего как средство для калиброва-

* Уличный шум в Нью-Йорке дает по среднему подсчету давление около $5 \text{ дин}/\text{см}^2$ и может достигать даже $20 \text{ дин}/\text{см}^2$.

ния; он применяется только в лабораторных измерениях. Для практических целей нужны более подходящие и прочные инструменты, поэтому обычно прибегают к электрическим микрофонам, предпочтительно не резонансного типа. Микрофоны превращают акустические колебания в электрические, которые затем усиливаются подходящим ламповым усилителем и в надлежащих условиях могут быть легко и точно измерены. Предлагался и целый ряд других приспособлений (главным образом, технических, резонансного типа) для измерения или записи звука, однако, по ряду причин они почти полностью вытеснены электрическими методами, главным образом конденсаторными (или электростатическими) микрофонами.

Конденсаторный микрофон в существенных чертах состоит из сильно натянутой металлической мембраны, располагаемой параллельно металлической пластинке на очень близком расстоянии от нее, так что зазор между ними равен приблизительно 0,025 мм. Тонкий слой воздуха в этом зазоре повышает упругость системы, так что собственная частота мембраны получается очень высокой, — обычно выше нормально передаваемого диапазона акустических частот. На конденсатор, состоящий из неподвижного электрода и мембраны, накладывается через большое сопротивление разность потенциалов около 200 V. Звуковые волны, действуя на мембрану, заставляют ее колебаться, вызывая этим изменения емкости конденсатора, на зажимах последовательно включенного сопротивления возникает переменная электродвижущая сила; последнюю легко можно усилить ламповым усилителем и измерить посредством выпрямителя (например термонары) и микроамперметра. Форму волны можно в то же время определить с помощью катодного осциллографа. Конденсаторный микрофон, правда, не слишком чувствителен, но преимущество его в том, что он почти одинаково хорошо работает во всем диапазоне акустических частот, и потому представляет собой удобный стандартный прибор, который может быть прокалиброван в абсолютной мере.

ИЗМЕРЕНИЕ ШУМОВ

Кажется, лорд Кельвин сказал, что если найден способ измерения, то можно начать изучать явление. Ясно, однако, что вопрос об измерении шума довольно сложен. Помимо физических здесь затрагиваются еще и физиологические и психологические вопросы. С физической точки зрения, очевидно, желательно прийти к соглашению относительно выбора системы физических величин. Желательно, чтобы эта система была абсолютной, с тем чтобы существовала возможность: а) перевода качественных субъективных суждений и ощущений на язык фактов и цифр; б) выяснения причин и характерных особенностей шумов, в) сравнения результатов наблюдений различных исследователей и д) установления произвольных стандартов, пригодных с точки зрения социальных, технических и правовых требований.

Практическое измерение шума сводится к одной или нескольким операциям из числа следующих:

1. Физическое измерение общей мощности или энергии шума, так чтобы в конечном счете результат был выражен в абсолютных единицах (например, в динах или микроваттах на квадратный сантиметр).
2. Физический анализ шума и получение акустического спектра шумовых компонент. Такой анализ может быть получен путем записи отдельных шумов, в частности шума машин.
3. Физическое определение формы волны шума, хотя количественное ее истолкование подчас затруднительно, особенно в случае апериодического шума.
4. Измерение громкости шума на слух в каких-либо подходящих единицах — другими словами, субъективно-физиологическая оценка „шумности“ при помощи уха.

ФИЗИЧЕСКОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ШУМА

Мы уже говорили об измерении звуковой энергии с помощью конденсаторного микрофона и усилителя. Усиленный ток подается или на выпрямитель и микроамперметр

(градуированный по желанию на децибел) с целью измерения, или одновременно с этим и на катодный осциллограф, если желательно определить форму волны. Ввиду того, что показания микроамперметра служат мерой физической интенсивности, а не громкости (зависящей от различной чувствительности слуха к тонам различных частот), в измерительный контур включаются иногда корректирующие цепи, имеющие целью согласование результатов измерения с данными нормального слухового восприятия. Частотную характеристику аппаратуры следует выбирать, ориентируясь на уровень громкости в 30—40 дБ над порогом слышимости по шкале со стандартным тоном в 1000 герц.

В случае необходимости анализ шума может быть произведен путем включения в контур электрических фильтров, пропускающих узкую полосу частот („полосовых“ фильтров). Таким образом можно определить энергию, приходящуюся на отдельные компоненты или полосы частот. Правда, таким путем не всегда возможно добиться резкой избирательности, однако, с другой стороны приходится признать, что и познания наши в данной области недостаточно обширны и не позволяют установить точного соответствия между общей громкостью шума и энергией или громкостью отдельных его компонент.

Анализ шума по методу „зондирующего“ тона

Вопрос анализа шумов более или менее периодической природы в значительной степени упростился благодаря введению метода „зондирующего“ тона, метода, который дает возможность легкого анализа и допускает гораздо более высокую избирательность в широком диапазоне частот, чем это возможно при работе с „полосовыми“ фильтрами.

Метод „зондирующего“ тона заключается в следующем: анализируемый шум принимается микрофоном, микрофонный ток усиливается и „смешивается“ в ламповом выпрямителе или модуляторе с зондирующим синусоидальным

током постоянной амплитуды, получаемым от гетеродинного генератора; частота зондирующего тона плавно изменяется. Таким образом модулированный ток содержит не только зондирующий тон, но также суммовые и разностные тоны, комбинирующиеся из зондирующего тона и отдельных компонент шума. Например, если частота зондирующего тона равна S , а частота одной из компонент C , частоты суммового и разностного тонов будут $(S + C)$ и $(S - C)$.

Один из способов обнаружения существования этих тонов состоит в возбуждении модулированным током какого-либо механического резонатора с острой избирательностью, например стального стержня, способного совершать продольные колебания. При плавном изменении зондирующей частоты стержень резонирует каждый раз, как $(S + C)$ или $(S - C)$ становятся равными собственной частоте стержня. Так как S известно, то можно определить C ; с другой стороны, амплитуда колебаний резонатора, наблюдаемая каким-либо подходящим способом, позволяет судить об энергии, приходящейся на данную компоненту. В практических условиях S может изменяться, скажем от 11 000 до 16 000 герц; собственная частота стержня берется порядка 16 000 герц, если разыскивается суммовой тон, и 11 000 герц, если разыскивается разностный тон. Грютцмакер вместо механического резонатора применяет дроссельный фильтр, пропускающий лишь частоты ниже 30 герц. Тогда в большей части случаев и зондирующий и суммовой тоны будут отфильтрованы, и только разностные тоны с частотами меньше 30 герц пройдут через фильтр и будут действовать на усилитель и детектор. Таким образом при непрерывном изменении зондирующей частоты детектор будет реагировать только тогда, когда эта частота будет отличаться менее чем на 30 герц от одной из компонент шума. Величина отсчета за детектором является мерой интенсивности соответствующей компоненты. В установках Национальной физической лаборатории частота зондирующего тона меняется, примерно, от 30 до 10 000 герц при повороте воздушного конденсатора на 180° .

ИЗМЕРЕНИЕ ШУМА НА СЛУХ

Как мы уже увидели, громкость любого чистого тона или вообще любого сложного звука может быть оценена на слух путем сравнения ее с громкостью стандартного чистого тона средней высоты (выше 700 герц), силу которого можно по желанию изменять в пределах, определенных посредством калибрования физическими методами. С другой стороны, для этой цели можно определять замаскированную громкость стандартного тона, маскируемого или заглушаемого измеряемым звуком. Стандартный тон можно получить от электрического мембранного зуммера (подобного, например, зуммеру в аудиометре Сименса-Баркгаузена, дающему частоту около 800 герц), от лампового генератора (например, генератора в аудиометре Вестерн-Электрик, дающего 8 различных частот) или от граммофонной пластинки (с чистыми или „воющими“ тонами), применяя при этом соответствующие аттенюаторы.

При работе с аудиометрами различного типа наиболее точные результаты получаются тогда, когда при ряде последовательных наблюдений мы подходим к критическому значению попеременно с обеих сторон. В общем, опыт показывает, что большинство людей после небольшой практики может получать прекрасно согласующиеся результаты даже с простейшей формой аудиометра, по крайней мере при измерении более или менее длительных шумов. Вообще говоря, работать по методу определения замаскированной громкости легче, нежели по методу сравнения громкостей. В Соединенных штатах предпочитают метод определения замаскированной громкости, исходя из того, что полученные таким образом результаты дают представление о степени „оглушения“ или о повышении порога слышимости для различных частот используемой полосы.

ОПЫТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ШУМОВ С ПОМОЩЬЮ ЗУММЕРА

В 1929 г. я произвел ряд грубых измерений шумов с помощью зуммера, состоящего из согнутой стальной полоски (eclker), какие иногда применяются на лекциях. Тон

такого зуммера очень высок и поразительно далеко слышен, в спокойной обстановке он слышен еще на расстоянии в 300 м. Эффект маскирования зуммера наблюдался в самых разнообразных условиях. В кабине аэроплана или вблизи работающего аппарата для пневматической клепки тон зуммера слышен на расстоянии 60—90 см, а рядом с аэропланым мотором только на расстоянии десятка сантиметров. Применяя, впрочем, не вполне обоснованно, закон обратных квадратов, можно сказать: опыты с зуммером подтвердили, что шум в вагонах подземной железной дороги (75—80 дб) значительно громче шума в экспрессе, идущем со скоростью 90 км/час, даже в коридоре с несколькими открытыми окнами (70 дб). Действительно, хорошо известно, что в вагоне подземки разговаривать и слушать трудно, а в поезде, в вагоне с закрытыми окнами легко, особенно в вагонах первого класса с мягкой обивкой.

Шум в кабине аэроплана при перелете через канал оказался по меньшей мере в тысячу раз (на 30 дб) сильнее шума экспресса, хотя стены кабины с деревянной обшивкой и ослабляли в сто раз (на 20 дб) шум мотора. Предпочтение, оказываемое сведущими пассажирами местам в конце кабины по сравнению с местами вблизи от боковых пропеллеров оправдалось, так как между ними обнаружилась разница около 10 дб. Было также найдено, что обычно применяемое пассажирами аэроплана закладывание ушей ватой уменьшает шум примерно на 10 дб.

Измерение шумов с помощью камертона

Очень удобный и портативный прибор для измерения шума был разработан Дэвисом в Национальной физической лаборатории. Возбудив каким-нибудь подходящим способом камертон (можно просто ударять его о каблук башмака, не принимая обычных мер предосторожности), нужно поднести камертон возможно ближе к уху, однако не касаясь его. При этом отмечается момент возбуждения камертона и наблюдается время, в течение которого громкость камертона спадает до уровня окружающего шума. При желании

Продолжение табл. I

	Расстояние	Средний уровень над порогом слышимости в дб	Наблюдатель
Шумы железнодорожного транспорта.			
Английские данные			
Экспресс	3,6 м	100 (?)	Дэвис
„ 90 км/час.	в коридоре с откр. окнами	70	Кэй
Вагон с открытыми окнами . .	внутри	60	„
Вагон с закрытыми окнами . .	„	55	Дэвис
„ „ 3-го класса	„	50	„
„ „ 1-го класса	„	45—50	Кэй
„ „ спальный 1-го класса . .	„	„	„
Пригородный электропоезд при отправке	„	70	Дэвис
Подземная жел. дор. (Лондон) .	внутри вагона	80	„
„ „ „ „	„	75—80	Кэй
Американские данные			
Экспресс, пульман. вагон . . .	внутри	60	Паркинсон
Пригородный поезд	„	65	„
Подземный экспресс в Нью-Йорке	4,5—7,5 м	95	Гальт
Подземный экспресс в Нью-Йорке	внутри ваг.	95	Паркинсон
Пригородный подземный поезд в Нью-Йорке	1—9 м	90	Гальт
Нью-йоркский надземный поезд	4,5—6 м	90	„
„ „ „	внутри вагона	75	Паркинсон
В американском пульмановском вагоне (Паркинсон)			
шум возрастает на 3 дб при увеличении скорости на 15 км/час			
„ „ „ 5 дб при открывании окна			
„ „ „ 5 дб при проходе встречного поезда			
„ „ „ 10 дб в туннеле			
„ „ „ 5 дб в коридоре			
шум уменьшается на 5—10 дб, когда спальные места подняты.			
Различные шумы			
Разговор	—	40—60	Гальт
Шопот	1,5 м	10—40	Дэвис
Аплодисменты (Нью-Йорк, Линдберг)	в толпе	90	Флетчер
Ресторан (Лондон)	внутри	40—70	Дэвис
Наборный цех	„	70	„
Церковные колокола	360 м	60	Гальт
Гром	1,5—4,5 км	65	„

Продолжение табл. I.

	Расстояние	Средний уровень над порогом слы- шимости в db	Наблюдатель
Звери			
Рычание льва (Нью-йоркский зоологический сад)	5,5 м	85	Гальт
Рычание сибирского тигра . . .	2 "	80	"
Ворчание бенгальского тигра . .	3,5 "	75	"
Лай собаки на улице	6 "	65	"
Шумы большой громкости			
Клепка	10 м	95	"
"	60 "	80	"
Пневматическое сверло	6 "	90	Дэвис
Типография (печатный цех) . .	—	90	"
Пароходная сирена	35 м	95	Гальт
"	450 "	60	"
Строительные работы	30 "	75	"
Ниагарский водопад	в самом шум- ном месте	85	Ройс
Шумы аэротранспорта			
Мотор аэроплана	3 м	110	Дэвис
"	5,5 "	115	Паркинсон
Кабины аэроплана (различные)	внутри	80—110	Дэвис
Кабины аэроплана	"	95	Паркинсон
Три летящих аэроплана	900 м	60	Гальт

ЛИТЕРАТУРА. Davis, Journal Roy, Amer. Soc., 1931; Free, Journ. Acous. Soc. Amer., 1930; Parkinson, Journ. Acous. Soc. Amer., 1930.

можно измерить также время, по истечении которого звук камертона начинает маскироваться шумом. Скорость ослабления звука камертона калибруется в децибелах с помощью зуммера или аудиометра какого-либо другого типа. Так как спадание громкости звука камертона протекает практически по логарифмическому закону, то кривая калиб-

рования „децибелы — время“ приблизительно прямолинейна. Производство отсчета облегчается, если при сравнении силы звуков камертон попеременно придвигается к уху и отодвигается от него, так что звук становится то громче, то слабее исследуемого шума. Камертон, применявшийся Дэвисом, имел частоту в 640 герц. Громкость его тотчас после ударов равнялась приблизительно 90 *дб*, а скорость спада громкости составляла около 1,5 *дб/сек*. Шумы силою в 110 *дб* измерялись с помощью наблюдений над эффектом маскирования.

Дэвис применил этот метод к определению громкости самых разнообразных шумов в пределах слышимости и получил результаты, которые, как видно из табл. I, хорошо согласуются с результатами американских исследований, произведенных с помощью аудиометра.

СВЯЗЬ МЕЖДУ ГРОМКОСТЬЮ И МАСКИРУЮЩИМ ДЕЙСТВИЕМ ШУМА

Маскирующее действие шума зависит от его состава и теоретически в общем случае нельзя связывать громкость шума (определяемую физическими способами или на слух) с маскирующим действием, определяемым на слух с помощью того или иного аудиометра. В действительности, однако, оказывается, что для большинства сложных и достаточно длительных шумов повседневной жизни громкость шума отличается от значения, полученного по методу определения замаскированной громкости, на почти постоянную величину, имеющую тенденцию немного увеличиваться для более громких шумов и для шумов прерывистого характера.

Нью-йоркская комиссия по борьбе с шумами установила, что для обычных уличных шумов и шумов внутри зданий значение громкости для средней области частот превышает значение, полученное по методу определения замаскированной громкости в среднем приблизительно на 15 *дб*. Для звуков очень сильных (90 *дб*), например для громкого шума большой толпы, разница получается, по докладу Комиссии в „City Noise“ в 20 *дб*. Дэвис при своих

опытах с камертоном нашел ту же величину разности для громкости в 110 дб. Он установил также почти прямолинейную зависимость между значениями, полученными по методам замаскированной громкости и сравнения громкостей для шумов средней силы.

При измерениях, проделанных Авиационной комиссией (Aeronautical Research Noise Sub-Committee) над шумами очень большой интенсивности, производимыми аэроплан-ными пропеллерами, было найдено, что эти два значения разнятся на 20—30 дб, хотя надо признать, что измерения, делающиеся в таких условиях, поневоле являются несколько грубыми.

ПРИМЕРЫ ИЗМЕРЕНИЯ ШУМА

Для иллюстрации сказанного полезно будет привести несколько простых примеров измерения повседневных шумов.

Разговорная речь имеет громкость от 40 до 60 дб. Если, однако, приблизить губы говорящего к уху человека на расстояние в 1 см, громкость речи для слушающего возрастает примерно до 100 дб. Обычный автомобильный гудок звучит на расстоянии 6 м с громкостью около 80 дб. Любопытно, что одновременный крик двух близнецов только на 3 дб громче крика одного из них; шум усиливается на 3 дб, когда слушатель приближается к источнику шума на 30% (на открытом воздухе); приближение еще на 20% (т. е. уменьшение расстояния вдвое) дает прирост громкости на 6 дб.

На рис. 4 изображен своего рода „шумовой термометр“ — шкала шумов с громкостью, доходящей до 100 дб; превышение этого предела в обычных условиях мало вероятно. Шумы разбиты на несколько обширных групп (левая часть рисунка), часть шкалы выше 50 дб выделена особо, так как она содержит шумы, с которыми следует, поскольку к тому представляется возможность, бороться. Мы можем смотреть на эту цифру, как на своего рода „нормальный“ уровень нашего шумового термометра.

Табл. I дает громкость различных шумов (с точностью до 5 дб) по английским данным (Национальная физическая лаборатория) и по американским определениям, произведенным по большей части Комиссией по борьбе с шумами (при этом выбирались числа, соответствующие опытам с эталонным тоном средней высоты). Обратимся теперь к рассмотрению тех из этих данных, которые представляют общий интерес.

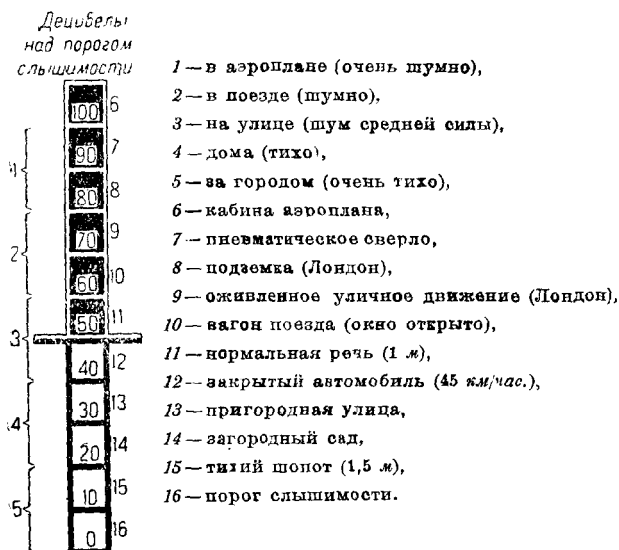


Рис. 4.

В табл. I приведен целый ряд шумов уличного движения в Лондоне и Нью-Йорке; если можно говорить о точном сравнении их, то, повидимому, нужно признать, что улицы Нью-Йорка в среднем децибелов на 10 шумнее соответственных лондонских улиц. Хотя в Лондоне есть места, где на расстоянии десяти шагов не слышно собачьего лая, но зато в Нью-Йорке, по указаниям комиссии, есть площади, где мог бы непрерывно реветь и тигр, не привлекая внимания прохожих. Утверждают, что в Нью-Йорке есть перекрестки, на которых, поскольку удалось исследовать, шум сильнее, чем где бы то ни было на свете; таков, например,

угол 6-й Авеню и 34-й улицы, где соединяются три главных улицы, проходят три трамвайных линии, двойной путь надземной железной дороги и подземка. Главным нарушителем тишины является надземная железная дорога; я считаю мало вероятным, что Лондон разрешит построить у себя над головой нечто подобное надземной железной дороге, проходящей над улицами.

Нью-йоркская комиссия нашла, что „приливы“ и „отливы“ шума в течение дня протекают параллельно с изме-

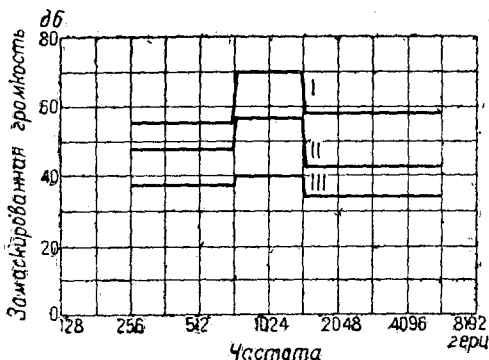


Рис. 5. I — проезд Линдберга, II — духовой оркестр, III — тишина.

нениями плотности уличного движения, по крайней мере вплоть до цифры в 50 экипажей в минуту. Естественно ожидать некоторого уменьшения уличного шума в верхних этажах зданий, но эффект этот сказывается значительно слабее, если высокие здания стоят по обеим сторонам улицы. В таком случае даже в „небоскребах“ снижение шумности наблюдается только на этажах, лежащих выше противоположного дома. В некоторых нью-йоркских и чикагских отелях рекомендуется выбирать комнаты не ниже 20-го этажа.

Рис. 5, данный Гальтом, показывает значения маскированной громкости, полученные с помощью аудиометра с тремя полосами частот (воющие тоны); кривые относятся к шуму толпы во время прибытия в Нью-Йорк Линдберга после его перелета через Атлантический океан. Наблюдатели помещались на 5-м этаже, приблизительно на расстоянии 33 м от улицы. Маскирующее действие шума толпы, приветствующей Линдберга при его появлении, резко выражено, действительно этот шум в состоянии маскировать звуки духового оркестра, находящегося на небольшом расстоянии. Как замечает Гальт, мы имеем здесь количе-

нениями плотности уличного движения, по крайней мере вплоть до цифры в 50 экипажей в минуту. Естественно ожидать некоторого уменьшения уличного шума в верхних этажах зданий, но эффект этот сказывается значительно слабее, если высокие здания стоят по обеим сто-

ственный метод, пользуясь которым артисты и другие любители публики могут периодически проверять свою популярность.

Что касается отдельных компонент уличного шума, то по имеющимся ограниченным данным относительно английских и американских трамваев, последние мало различаются между собой по шумности. То же замечание, повидимому, справедливо и для автомобилей. Интересно отметить, что современный автомобиль при умеренной скорости дает меньший шум, нежели конный экипаж на мостовой.

Немалая часть уличного шума приходится на автомобильные гудки. Поэтому по поручению Министерства транспорта Национальная физическая лаборатория произвела небольшое исследование шумности и резкости гудков. Наблюдения производились в закрытом помещении с сильно заглушенными стенами. Шум измерялся как физическими методами, так и на слух; с помощью катодного осциллографа снимались осциллограммы исследуемых звуков. Насколько можно судить по небольшому числу наблюдений, резкость звука в значительной степени непосредственно зависит от его громкости, хотя некоторое значение имеют и другие факторы: наличие интенсивных высоких компонент, ясно выраженный диссонанс и особенности начального периода. Установить зависимость между резкостью звука и формой колебания еще не представляется возможным.

Нью-йоркская комиссия по изучению шумов пришла примерно к тем же заключениям. Она считает, что сигналы, дающие звук громче 90 *дб* на расстоянии 7 м, не нужны и следует возражать против их применения. Комиссия находит также, что жалобы на резкость звука прекратятся, если основные тоны сигнала будут лежать между 200 и 300 герц, причем все компоненты будут гармониками основного тона с равномерным распределением энергии между ними, и если в звуке отсутствуют сильно выраженные высокие частоты.

Что касается поездов, то по громкости шума в вагонах сходного типа экспрессы и пригородные поезда в Англии и Америке, повидимому, мало различаются между собой

Американский способ подразделения пульмановского вагона занавесками, помимо прочих недостатков, обуславливает, по-видимому, более высокий уровень шума, чем в английских более совершенно разделенных купе вагонов. Правда, многое зависит здесь от других факторов, например от хорошей пригонки дверей и окон, препятствующих проникновению шума. Что касается подземных железных дорог, то нью-йоркская подземка, как может подтвердить каждый, кто ездил по ней, особенно шумна, лондонские подземки тише по крайней мере на 10 дб, хотя, конечно, вопрос не может быть решен без учета скорости.

Одними из самых громких звуков, с которыми приходится встречаться, являются шумы клепки, пневматического сверла, звук паровой сирены и шум печатных машин. Еще громче рев льва и шум Ниагарского водопада — шумы примерно одинаковой громкости (85 дб). Наиболее громким и неприятным является шум аэропланного мотора (110 дб). Шум в кабинах летящих аэропланов доходит до 80—110 дб смотря по типу машины. Доминирующим фактором является, по-видимому, шум пропеллеров, хотя выхлопы мотора и общий шум машины почти не отстают от них по силе; борьба с шумом должна вестись по всем трем направлениям. Надо заметить, что в настоящее время Авиационная комиссия по исследованию шумов рассчитывает значительно снизить шум в кабинах аэропланов (возможно до уровня шума железнодорожного поезда). Будут применены пропеллеры с меньшей скоростью, более совершенные глушители выхлопа, шум мотора предположено ослабить путем заключения его в кожух; кабины должны строиться с двойными хорошо изолирующими стенами.

Защита от шума

Наилучший способ защиты от шума — это устранение причин, способствующих его возникновению. Это гораздо более действительно, нежели попытки последующей борьбы с шумом. Например, следует защищать машины закрытыми кожухами, обеспечить лучшее уравнивание и сборку;

монтировать их на изолирующих материалах. Что касается шума уличного движения, то в большинстве случаев наиболее неприятен шум, даваемый неправильно нагруженными и изношенными экипажами. На шумных улицах с большим движением защита зданий от шума ложно зачастую осуществляется созданием „звуковых теней“ и изобретательностью архитекторов в смысле устройства „буферных“ помещений, примеры которых мы видим в новых зданиях Британской корпорации широко вещания (Butisch Broadcasting Corp.).

Защитное действие строений прекрасно иллюстрируется тишиною замкнутых четырехугольных зданий, подобных Inns of Courts, * находящихся в непосредственной близости от шумных улиц. Спальни, выходящие окнами на внутренний двор отеля, обычно бывают значительно спокойнее комнат, расположенных по внешней стороне здания.

Существует два основных способа изоляции внутренних помещений от шумов: жесткие непористые стены или перегородки и многослойные перегородки, причем отдельные слои должны быть по возможности независимы друг от друга и разделяться слоем воздуха или какого-либо рыхлого заполнения.

Для сплошных массивных стен основным фактором является вес; поглощение звука (в децибелах) пропорционально логарифму массы стены, приходящейся на квадратный метр ее поверхности. На рис. 6 даны результаты измерений Дэвиса и Литтлера в Национальной физической лаборатории. Их результаты, вместе с результатами Кнудсена, Бюро стандартов и другими относительно звукопоглощения обычных перегородок в области средних частот (512 герц), сведены в табл. II. Вообще говоря низкие частоты поглощаются меньше высоких. Проводимость перегородок связана главным образом с колебаниями их (перегородка работает как мембрана); поэтому в области низких частот может сказываться резонанс, имеющий в нормальных условиях лишь второстепенное значение.

* Inns of Courts — 4 английских общества адвокатов (Inner Temple, Middle Temple, Lincoln's Inn, Gray's Inn). *Прим. ред.*

ТАБЛИЦА II

Звукоизоляция твердых однослойных перегородок

Масса на 1 м ² стены	Ослабление звука в дб	Масса на 1 м ² стены	Ослабление звука в дб
0,44 кг	9	44 кг	38
0,88 "	14	88 "	43
2,2 "	20	176*	48
4,4 "	24	264 "	51
8,8 "	29	440 "	54
22,0 "	33		

На практике для ориентировочного расчета можно принять, что удвоение массы увеличивает изоляцию приблизительно на 5 дб, хотя эффекты резонанса могут нарушить это соотношение.

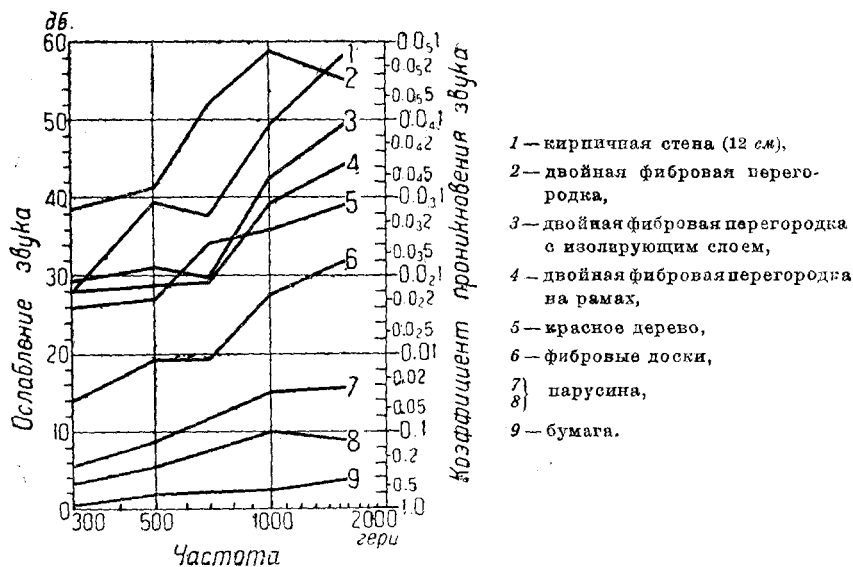


Рис. 6.

Для пористых гибких материалов Кнудсен находит, что звукоизоляция пропорциональна скорее массе, приходя-

* Кирпичная стена 12 см толщиной.

щейся на 1 м^2 стены, чем логарифму этой величины. Часто оказывается выгодным комбинировать пористые материалы с плотными жесткими перегородками. Упомянем, что для звуковых киноаппаратов выбирается звукоизоляция от 50 до 70 дб.

Что касается многослойных перегородок, то их не следует пробивать насквозь гвоздями, т. е. слои должны быть совершенно изолированы друг от друга, чтобы при той же общей толщине слоистые перегородки поглощали (как это и должно быть) лучше ординарных. Целесообразно ли делать прослойку между перегородками из пористого материала и вообще нужна ли такая прослойка, должен решить опыт. С одной стороны, прокладка может поглощать и заглушать колебания, а с другой — она же может служить связью.

На вопрос о защите от звуков, передающихся через стены здания, надо надеяться, будет направлено внимание новых акустических лабораторий, открываемых при Национальной физической лаборатории. До сих пор по этому вопросу было произведено мало систематических исследований. Здесь, повидимому, имеют значение разнородность и нарушение непрерывности, а рыхлые заполнители могут предохранять от дребезжания резонирующих перегородок и стен, часто сопровождающего такие колебания и приводящего иногда к значительному излучению звука.

Во многих домах главную роль в отношении пропускания внешнего шума играют окна. Постройка звуконепроницаемых зданий значительно упростилась бы, если бы можно было устранить окна. Об этом, правда, не стоит говорить, но во всяком случае нужно делать окна из толстого стекла. Окно, приоткрытое даже слегка, почти уничтожает преимущества, полученные благодаря защите от шума с помощью поглощающих устройств. В известных пределах количество звуковой энергии, пропущенной через трещину или приотворенное окно, пропорционально площади отверстия. При двери или окне, дающих, скажем, звукоизоляцию в 30 дб, трещина с площадью в 0,001 площади двери может пропустить столько же звуковой энергии, сколько проходит сквозь все окно или дверь.

Рис. 7 (данный Норрисом) показывает увеличение громкости шума в комнате при постепенном открывании окна, выходящего на улицу. Здесь видно, что малое отверстие может дать большой эффект. Наконец, можно добиться значительного улучшения, не давая проникшему в помещение шуму разростись до большой мощности благодаря реверберации, которая может быть уменьшена путем обшивки стен и потолка поглощающими звук материалами. Многие банки и учреждения Сити в настоящее время с успехом применяют это средство. Я вполне понимаю, что многие дома в Нью-Йорке обивают притолки входных дверей поглощающими материалами, что, как говорят, дает значительные преимущества.

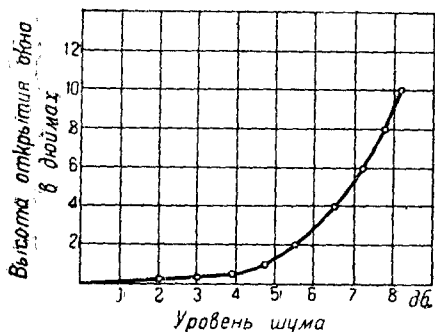


Рис. 7.

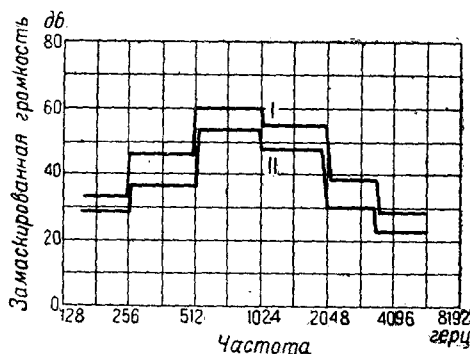


Рис. 8. I — незаглушенные стены (время реверберации 5 сек.). II — заглушенные стены (время реверберации 1 сек.).

щим материалом на результаты измерений маскирующего действия в помещении, куда доносится городской шум. Как видно из рисунка, замаскированная громкость уменьшается в среднем приблизительно на 7 дБ при уменьшении времени реверберации от 5 до 1 сек.