

ОБЗОР РАБОТ ПО РЕЗОНАНСНЫМ ЗВУКОПОГЛОТИТЕЛЯМ.

С. Н. Ржевкин.

§ 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА О ЗВУКОПОГЛОТИТЕЛЯХ.

Основы архитектурной акустики заложены работами американского физика-акустика Уолласа Сэбина, сделанными в начале нашего века ¹. Работы эти показали, что для получения хороших акустических условий в помещении необходимо применять специальные материалы — звукопоглощающие материалы. В последующие годы в ряде стран, особенно в Америке, было разработано большое количество новых типов пористых звукопоглощающих материалов. Обычно при этом шли по пути чисто эмпирического изготовления новых материалов, получая путём постепенной подгонки состава пористой массы и вариаций конструкции ту или иную желательную частотную характеристику поглощения. Таким путём возникли десятки различных типов материалов, выпускаемых ныне многочисленными фирмами *).

Эмпирическая методика разработки почти не позволяла предвидеть, какие изменения произойдут в частотной характеристике звукопоглощения при том или ином изменении состава массы или конструкции. Спроектировать новый материал с видоизменённой характеристикой звукопоглощения, например, с очень большим коэффициентом звукопоглощения в той или иной области частот или во всём звуковом диапазоне, было невозможно ввиду отсутствия руководящих теоретических соображений.

В 1937 году началась интенсивная подготовка акустического проекта большого зала Дворца Советов, высота купола которого намечена около 100 м (рис. 1). В связи с этим возникла необходимость в создании новых звукопоглощающих материалов, которые давали бы практически полное поглощение звука в весьма широком диапазоне от 100 до 4000 герц. Даже ничтожное отражение звука от купола столь большого зала грозило опасностью появления сильного эхо, которое искажило бы передачу речи и музыки. Задача создания материала с достаточно высоким коэффициентом звукопоглощения,

*) В известной книге В. Кнудсена по архитектурной акустике, вышедшей в 1932 г., около 14 стр. посвящено описанию и перечислению различных сортов поглощающих материалов.

близким к единице, казалась чрезвычайно трудной, и пути её решения в технике не были известны. Однако, благодаря работе ряда советских акустиков, сгруппировавшихся в Академии Наук СССР и при строительстве Дворца Советов, были достигнуты значительные успехи в развитии теории звукопоглощающих материалов, и была доказана полная возможность разрешения вышеуказанной задачи.

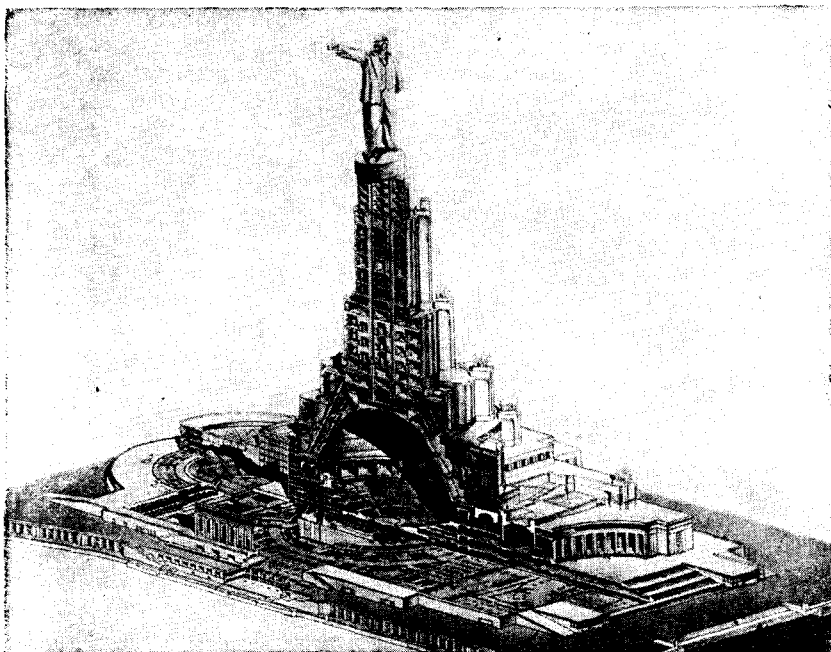


Рис. 1.

В этой статье я хотел бы сообщить основные сведения об одном из методов решения этой задачи, разработанном коллективом акустиков, работавших вместе со мною. Эти работы привели к созданию звукопоглощающих материалов, названных нами резонансными звукопоглотителями. В процессе работы по звукопоглотителям были найдены пути проектирования новых типов материалов с заданной частотной характеристикой поглощения. Эти материалы, или, точнее, конструкции, оказались пригодны для применения в строительной практике: для театров, зал, студий, кинотеатров и других помещений.

В настоящее время выясняется полная возможность отказаться от господствовавшей ранее эмпирики в разработке поглотителей звука и перейти к рациональному их проектированию на основе теории

В этом обзоре я постараюсь осветить историю развития резонансных звукопоглотителей, основные принципы их устройства и вопросы их применения.

§ 2. ИСТОРИЯ ПРИМЕНЕНИЯ РЕЗОНАТОРОВ В АРХИТЕКТУРНОЙ АКУСТИКЕ.

Ещё в древней Греции и Риме, в открытых театрах, применяли резонаторы в форме металлических сосудов, помещавшихся в спинках

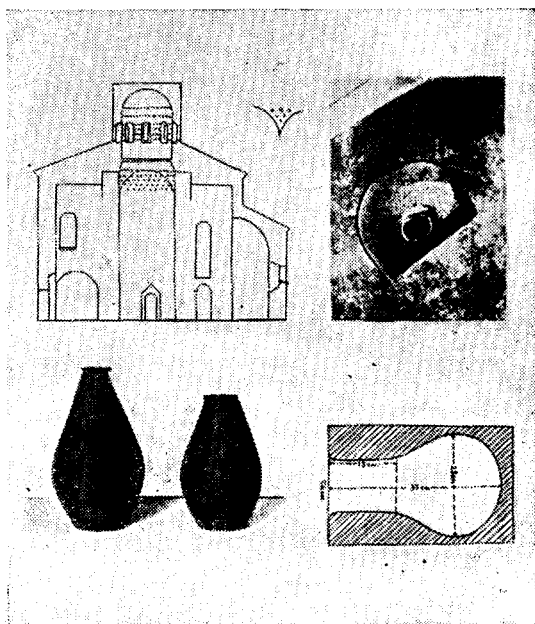


Рис. 2.

каменных скамей амфитеатров и своим отверстием выходивших в сторону сидящих на скамьях слушателей. Эти сосуды-резонаторы (эхейя — греч. *ηχηα*) настраивались на различные тоны гаммы и своим отзвуком, повидимому, создавали известное впечатление гулкости, свойственное закрытым помещениям и известное ныне под именем реверберации. Детали устройства «эхейя», их форма, размеры, число и размещение нам известны лишь в общих чертах по данным римского архитектора Витрувия.

Архитектурно-акустическое наследие древних перешло в Ви-

зантию, главным образом, по линии строительства храмов. В византийских храмах, а в дальнейшем в церквях Европы, в частности в древнерусских церквях, в стенах и сводах заделывались металлические или глиняные сосуды-резонаторы, служившие, по всей вероятности, для усиления отзвука голосов хора или музыки, т. е. для увеличения реверберации. На рис. 2 показано расположение резонаторов (голосников) в древних храмах Новгорода и Пскова. Подобные же сосуды часто устанавливали в театрах. Так в Малом театре в Москве существовали ранее в стенах сосуды-резонаторы, уничтоженные в дальнейшем при ремонтах здания.

В новейшее время резонаторы были применены для воздействия на акустику помещения в совершенно ином, диаметрально противоположном, направлении. В работах Сэбина было, например, обнаружено, что звукопоглощение слоя войлока определенной толщины имеет максимум в некоторой области частот. Слой в два, три и т. д. раза большей толщины имеет максимум поглощения при частотах, всё более и более низких. Это указывает на резонансный характер явления поглощения.

В 1932 г. Эрвин Майер² показал, что резонансный максимум поглощения наблюдается у замкнутых полостей, закрытых листом металла, фанеры или другого материала. Частота резонанса соответствует собственной частоте мембраны, подпертой упругой воздушной подушкой полости, лежащей под ней. В известной книге Гловера «Practical Acoustics»³ имеется указание на отделку некоторых американских театров своеобразными резонаторами в форме круглых металлических дисков, укрепленных на некотором расстоянии от стены на сетке или ткани. В данном случае резонансные полости имеют цилиндрическую форму с закрытыми основаниями цилиндра и открытой боковой поверхностью.

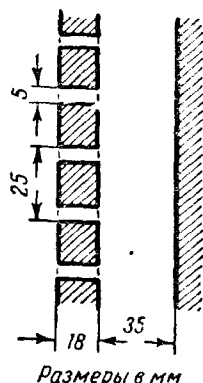


Рис. 3.

В 1933 г. Винтергерст⁴ опубликовал исследование поглощения звука перфорированным листом из жёсткой пористой массы (типа «Целотекс»), установленным на некотором расстоянии от стены (рис. 3). Полость за листом была пустой или заполнялась рыхлым пористым материалом. Винтергерст отметил, что этот поглотитель может рассматриваться как система отдельных резонаторов. Материалы типа «Сан-акустик» и им подобные, состоящие из жёсткого перфорированного покровного листа с рыхлой пористой массой под ним, уже давно известные в технике, также можно было рассматривать как резонансные звукопоглощающие системы.

В указанных примерах резонаторы являлись поглотителями звука и, следовательно, их воздействие приводило к уменьшению реверберации помещения.

§ 3. ВЛИЯНИЕ РЕЗОНАТОРОВ НА РЕВЕРБЕРАЦИЮ ПОМЕЩЕНИЯ.

Анализируя указанные выше данные о применении резонаторов, естественно было поставить вопрос: как же действуют резонаторы на акустику помещения? Когда они увеличивают и когда уменьшают реверберацию помещения?

В результате работ 1934—1936 гг. мне удалось осветить этот вопрос как с теоретической, так и с экспериментальной точки зрения⁵. Было показано, что резонатор, накапливая звуковую энергию

в своей полости, эквивалентен как бы некоторому добавочному объёму помещения. Этот объём тем больше, чем меньше затухание резонатора. С другой стороны, резонатор, обладающий некоторыми потерями на трение, непрерывно поглощает звуковую энергию, черпая её из запаса энергии помещения. Известная формула Сэбина для времени реверберации звука в помещении была представлена в изменённой форме:

$$T = 0,162 \cdot 10^{-2} \frac{V + V'}{A + A'}, \quad (1)$$

где V — объём помещения, а A — суммарное поглощение. В формулу Сэбина был введён, таким образом, добавочный объём V' и добавочное поглощение A' . Величина V' пропорциональна числу резонаторов и обратно пропорциональна квадрату суммарного коэффициента затухания. Добавочное поглощение A пропорционально числу резонаторов и коэффициенту трения в горле резонаторов. Анализ этой формулы показывает, что резонансные системы с мало затемированными резонаторами будут давать значительный добавочный объём V' и малое добавочное поглощение A' , что вызовет, согласно приведённой формуле, увеличе-

ние реверберации. Резонансные системы с большим затуханием, вызванным помещением пористого материала в горло резонатора или его полость, дадут большую величину A' при малом V' . Это поведёт к уменьшению времени реверберации T .

Для проверки этих теоретических соображений М. С. Анциферовым⁶ был поставлен следующий эксперимент. В ревербераци-

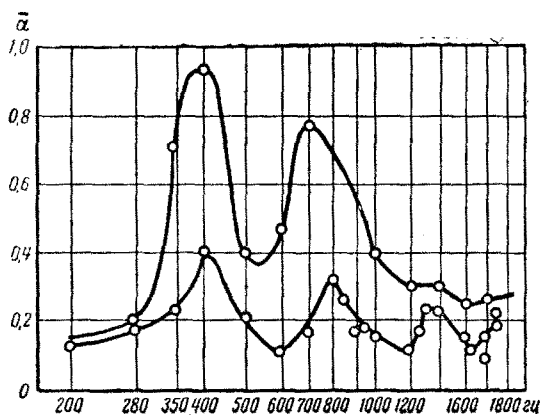


Рис. 4.

онную камеру было внесено 80 резонаторов с малым затуханием. Резонаторы представляли собой обычные широкогорлые бутылки для молока. Расчёт показал, что при резонансной частоте 230 герц каждый такой резонатор эквивалентен добавочному объёму 2 м^3 , а всё вместе — объёму 160 м^3 . Затухание всех резонаторов дало добавочно $14,5$ единиц поглощения. Время реверберации пустой камеры при 230 гц было найдено равным $0,48 \text{ сек}$. Оно увеличилось до $0,96 \text{ сек}$ при наличии 80 резонаторов. Этот опыт представлял хо-

роший пример действия мало задемпфированных резонаторов. Подобный же эффект должны были давать «эхейя» и «голосники».

Обратный эффект наблюдался Андиферовым на цилиндрических резонаторах со свободной боковой поверхностью, похожих по своему строению на грибы с большой шляпкой. Система таких резонаторов (диаметр 80 см, высота 3 см) дала средний коэффициент поглоще-

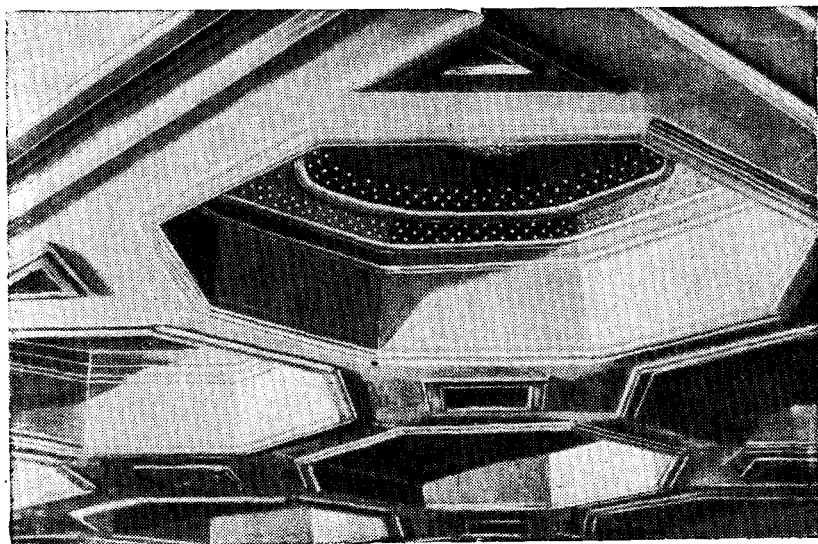


Рис. 5.

ния (α) на 1 м² поверхности, показанный на рис. 4 (внизу); ряд максимумов соответствовал вычисленным собственным частотам резонаторов. При размещении по боковой поверхности резонаторов тонкой полоски ткани, α резко увеличилось (рис. 4, верхняя кривая). Аналогичные наблюдения, сделанные нами позже, в Физическом институте Академии Наук⁷ на резонаторах в форме кессонов, ниш и панелей из дерева, установленных у стены, и т. п. показали, что во всех резонансных системах малое количество абсорбента, помещённое у входа в резонатор, где господствуют наибольшие скорости колебания воздуха, даёт сильное увеличение поглощения звука. Так, в примере, приведённом на рис. 4, то же количество ткани, положенной прямо на полу, давало поглощение в 10 раз меньше, чем оно дало в сочетании с резонаторами.

Эти наблюдения показали, что применение резонансных систем даёт очень эффективное использование пористого абсорбирующего материала при расположении его в горле резонатора и позволяет,

таким образом, достичь экономии дорогостоящего абсорбента, а также позволяет использовать менее густые и более дешёвые материалы (тонкая ткань, сетки) вместо больших масс абсорбента. Сформулированный здесь принцип экономии абсорбента был в дальнейшем использован при разработке более сложных и более совершенных систем. Возможность удобного решения задачи поглощения звука в области низких частот, где обычные абсорбенты мало эффективны, была использована при разработке резонансного звукопоглотителя для потолка одной из студий Дома Звукозаписи в Москве (рис. 5). Резонаторы расположены в центре розеток; в углублениях расположен пористый поглотитель, прикрытый перфорированным слоем.

§ 4. ВОЗМОЖНОСТЬ ПОЛНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ЗВУКА.

Обычные абсорбенты, применяемые в строительной практике, редко дают коэффициент поглощения больше чем 0,6—0,7 (по энергии), причём в области низких частот он очень быстро спадает и при 100 герц большинство абсорбентов совершенно неэффективны. Упомянутая выше задача акустики Дворца Советов упиралась в осуществление абсорбента звука с коэффициентом поглощения больше 0,9 в области низких частот и доходящего до 0,98 в области высоких частот. Решение этой задачи можно было намечать на основе работ Беделла⁸, Бёкеши⁹, Высоцкого¹⁰ и др. Оно состояло в применении большого числа слоёв ткани или очень толстого слоя мелко распушённой ваты. Однако, конструктивно, эти решения представлялись неудовлетворительными, и потому возникла мысль об изыскании новых путей решения задачи. Идея использования резонаторов была весьма заманчива, но ещё не было ясно, как можно получить при помощи резонаторов весьма сильное поглощение.

Г. Д. Малюжинец¹¹ указал, исходя из теоретических соображений, на принципиальную возможность полного поглощения звука при падении под некоторым углом на перфорированный жёсткий лист, сзади которого имеется набивка из пористого материала (материал типа «Санакустик»). Для этого между размерами перфорации и трением материала должно соблюдаться некоторое соотношение, пути практической реализации которого (для данной конструкции) остались неясны по причине трудности учёта параметра трения.

В 1937 г. я рассмотрел¹² весьма простую схему резонансного поглотителя (рис. 6, *a* и *b*), состоящего из ряда резонаторов с отверстиями, расположенными по квадратной решётке, с сопротивлением трения R , сосредоточенным в отверстиях, и показал, что полное поглощение звука при нормальном падении может быть получено на резонансной частоте при соблюдении условия

$$R = \frac{c^2}{\Sigma} \rho c, \quad (2)$$

где σ — площадь одного отверстия; Σ — площадь ячейки, приходящейся на один резонатор; ρ — плотность воздуха и c — скорость звука в воздухе. Величина R представляет сопротивление трения в отверстии, величину которого можно было легко подсчитать и, подобрав σ и Σ ,

удовлетворить условию (2). Таким образом, условие полного поглощения для такой системы возможно было практически реализовать. Следует отметить, что вопрос о точном вычислении поглощения звука резонаторами или системой резонаторов вызывал ещё в то время ряд

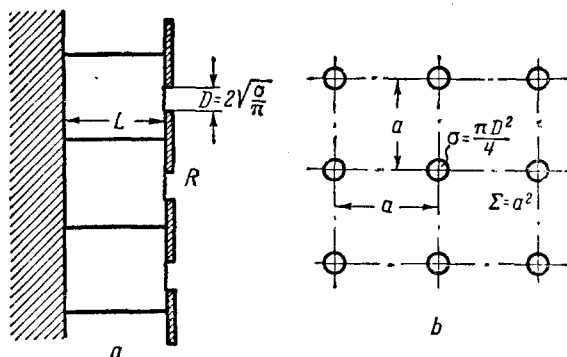


Рис. 6.

сомнений. Задача была сильно идеализирована и практические расчёты слишком схематичны. Поэтому акустики, работавшие в этой области, совершенно не были уверены в надёжности теоретических прогнозов о возможности получения высоких коэффициентов поглощения. Необходима была экспериментальная проверка теории.

Опыты по измерению поглощения звука резонаторами, поставленные в Лаборатории Акустики Дворца Советов С. Т. Тер-Осипяном в 1937 г. *), показали, что постепенное увеличение R (путём наложения на отверстие σ ряда слоёв марли) приводит, в конце концов, к величине, соответствующей формуле (2), и даёт коэффициент поглощения звука α , равный единице, т. е. полное поглощение. Эти опыты дали полную уверенность в правильности предложенной мною теоретической схемы и послужили толчком к дальнейшему развитию теории и практики резонансных звукопоглотителей. Полное поглощение звука в этих опытах было осуществлено при помощи очень малого количества редкого фрикционного материала, подобного марле или металлической сетке. Эти опыты натолкнули на мысль о возможности использования такого прочного и стойкого материала, как металлические сетки для создания конструкции эффективных абсорбентов. Идея применения сеток в качестве фрикционного материала была в дальнейшем использована Г. Д. Малюжиным при проектировании многослойных фрикционных поглотителей звука высокой эффективности для Дворца Советов¹³.

*) Работы остались неопубликованными.

Важность помещения фрикционного материала в зону максимальных скоростей, т. е. в горло резонатора большинством авторов, исследовавших в последующие годы этот вопрос (Целлер¹⁴, Иордан¹⁵, Джигли¹⁶), не была учтена в должной мере. Поскольку они исходили из схемы Винтергерста (рис. 6), в которой резонаторы лежали за перфорированным слоем пористой структуры (Целотекс и т. п.) (то-есть фрикционные элементы имели весьма сложную конфигурацию), то им не удалось количественно учесть величину затухания, а, следовательно, и величину коэффициента поглощения звука. Работы, проведённые мною совместно с Тер-Осипянцем¹⁷, и работы Нестерова¹⁸ привели к полной ясности в вопросе учёта затухания резонансных систем с фрикционным материалом в горле резонатора и позволили указать пути расчёта активного сопротивления резонаторов и коэффициента поглощения звука системой резонаторов. Это позволило уверенно перейти к проектированию более сложных систем.

Высокое поглощение, близкое к единице, может быть получено в простой резонансной системе с одним слоем резонаторов только вблизи от резонансной частоты. Для создания высокого поглощения в широком диапазоне частот такая система оказалась непригодна, и мы перешли для решения этой задачи к более сложным системам. Однако однослойный поглотитель оказался весьма удобен для решения целого ряда практических задач архитектурной акустики, о чём будет сказано несколько ниже.

Как показывает более строгое решение¹², однослойный резонансный поглотитель звука имеет не только один основной максимум поглощения. Выражение для коэффициента поглощения α при нормальном падении звука имеет вид:

$$\alpha = \frac{4R \frac{\sigma^2}{\Sigma} \rho c}{\left(R + \frac{\sigma^2}{\Sigma} \rho c\right)^2 + \left(2\pi f M - \frac{\sigma^2}{\Sigma} \rho c \operatorname{ctg} \frac{2\pi f L}{c}\right)^2}, \quad (2a)$$

где f — частота звука, M — масса воздуха в отверстии резонатора и L — глубина слоя резонаторов. Как легко видеть, при частоте $f_1 = \frac{c}{2L}$, а также при частотах $2f_1$, $3f_1$ и т. д. поглощение должно быть равно нулю (рис. 7). Между этими частотами поглощение будет достигать некоторых максимальных значений, тем ближе лежащих к единице, чем точнее величина R соответствует условию $R = \frac{\sigma^2}{\Sigma} \rho c$.

Здесь следует упомянуть о двух первоначальных попытках расчёта широкополосных звукопоглотителей, относящихся к 1937 г.²⁴. Одна из них принадлежит Г. Д. Малюжину, который предложил использовать систему большого числа перфорированных экранов,

устанавливаемых параллельно друг другу у стены, причём достаточно высокое поглощение звука в широкой полосе создавалось благодаря выбору величины трения воздуха в отверстиях; это определяло выбор размера отверстий. Величина трения была выбрана, исходя из данных Винтергерста о прохождении звука через отверстия²⁷. Расчёты поглотителя, дающего $\alpha > 0,9$ от 100 гц до 4 000 гц, привели к

сложной конструкции из 22 параллельных перфорированных листов общей толщиной около 1 м. Данные Винтергерста, относящиеся к прохождению звука через отверстия, из которых исходил Малюжинец, дают при пересчёте коэффициент трения, сильно отличающийся от других экспериментальных дан-

ных²⁸, и потому произведённый расчёт вызывал сомнения. Значительная громоздкость конструкции и сомнительность данных, положенных в основу её расчёта, послужили причиной того, что эта интересная идея была оставлена и даже не проверена на опыте.

Другая попытка создания широкополосного эффективного поглотителя была сделана мною и заключалась в том, чтобы расположить системы резонаторов, настроенных на различные области в широком диапазоне частот, не последовательно, а параллельно друг другу. При этом отверстия в большие резонаторы, поглощающие более низкие частоты, должны были проходить через один или два слоя резонаторов-поглотителей, настроенных на более высокие частоты. Сразу было выяснено, что такая конструкция практически трудно осуществима; точный расчёт системы параллельно расположенных резонаторов был также весьма труден. Всё это привело к тому, что идея параллельной системы поглотителей также была оставлена, хотя, несомненно, что в известных пределах она вполне может себя оправдать.

После этого была начата усиленная разработка методов расчёта и конструирования резонансных многослойных поглотителей, которые сулили вполне реальные перспективы в отношении создания высокоэффективного поглощения в широком диапазоне частот.

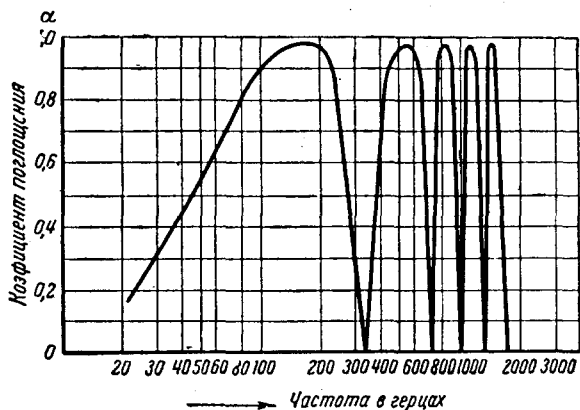


Рис. 7.

§ 5. МНОГОСЛОЙНЫЙ РЕЗОНАНСНЫЙ ЗВУКОПОГЛОТИТЕЛЬ.

Как мне удалось показать¹⁹, система, состоящая из нескольких последовательно соединённых резонансных ячеек (рис. 8) с подходящими величинами сопротивления трения R_i в отверстиях, может дать высокое поглощение в более широком диапазоне частот,

чем описанная выше простая резонансная система. Поглотитель, схематично изображённый на рис. 8, в предположении, что длина волны велика, можно рассматривать как сосредоточенную систему с несколькими степенями свободы. Её коэффициент поглощения будет иметь ряд максимумов, число которых равно числу слоёв. Исследованию и расчёту сложных резонансных поглотителей был посвящён ряд детальных работ В. С. Нестерова²⁰. Коэффициент поглощения α в функции частоты по заданным размерам и величинам сопротивлений R_i (прямая задача) находится, при нормальном падении звука, по известной формуле

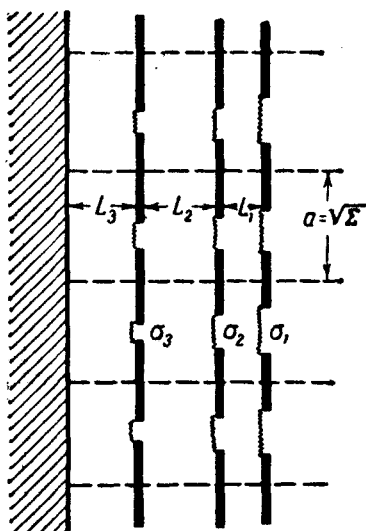


Рис. 8.

$$\alpha = 1 - \left| \frac{\frac{Z}{\Sigma} - \rho c}{\frac{Z}{\Sigma} + \rho c} \right|^2, \quad (3)$$

где Z — входной импеданс на площади одной ячейки резонатора. Величина Z определяется для любого числа слоёв через их импедансы изысканной формулой, в виде непрерывной дроби, найденной Нестеровым²¹. Однако на практике интересно решение не прямой, а обратной задачи — задачи нахождения параметров (размеров) системы и величин сопротивлений R_i , по величине коэффициента поглощения (α) в заданном частотном диапазоне. Эта трудная задача была решена В. С. Нестеровым²⁰ для двух- и трёхслойных резонансных систем. Им показано, что при помощи двухслойной системы возможно легко получить $\alpha > 0,9$ в диапазоне около $2^{1/2}$ октав и $\alpha > 0,95$ в диапазоне одной октавы. При помощи трёхслойной системы можно получить $\alpha > 0,9$ в диапазоне около 3—4 октав.

Пример частотной характеристики α для двухслойной системы при нормальном падении звука дан на рис. 9, а для трёхслойной — на рис. 10. Все выводы теории были детально проверены Нестеровым экспериментально на большом числе опытов (по методу стоячих

волн в трубе), и было найдено исключительно хорошее согласие теории с экспериментом¹⁸.

Следует отметить большой шаг вперед в области теории звука, сделанный в работе академика В. А. Фока²², который, заинтересовавшись нашими работами по поглощению звука, разрешил весьма трудную задачу нахождения акустической проводимости (K) отверстия диаметра d в перегородке, стоящей поперёк трубы диаметра D . Фок показал, что проводимость

$$K = \frac{D}{1 - \varphi\left(\frac{d}{D}\right)}, \quad (4)$$

где $\varphi\left(\frac{d}{D}\right)$ выражается в форме бесконечного ряда по степеням $\frac{d}{D}$.

При $D = \infty$, т. е. для отверстия в бесконечном экране, функция φ обращается в нуль, и мы получаем известное выражение Рейли ($K = D$). При приближении d к величине диаметра трубы φ стре-

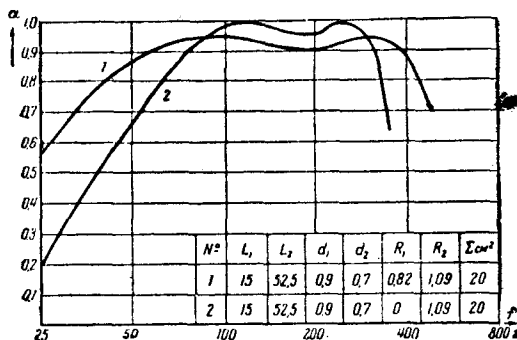


Рис. 9.

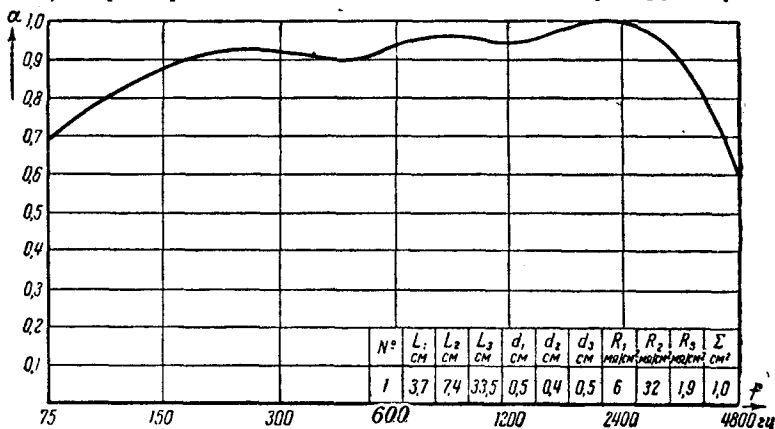


Рис. 10.

мится к единице, а проводимость K к бесконечности, что означает отсутствие добавочной кинетической энергии (сверх энергии плоской волны) и добавочной массы в таком отверстии. При $\frac{d}{D} < 0,2$ поправка Фока невелика, и ею можно часто практически пренебрегать. Проводимость K позволяет определить добавочную или

присоединённую массу ($m = \frac{\pi d^2 \rho}{4 K}$), определяющую инерционные свойства воздуха в отверстии диаметра d . Внесение поправки по формуле Фока позволило надёжно производить расчёты резонансных поглотителей при больших отношениях d/D , поскольку задача расчёта резонансного поглотителя при нормальном падении звука тождественна с задачей расчёта распространения звука в трубе, опирающейся на площадь, занимаемую одним резонатором.

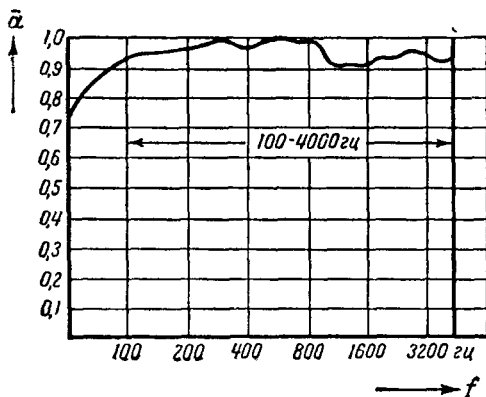


Рис. 11.

граммы²¹. При помощи этого метода удаётся весьма упростить реше-

В. С. Нестеровым дан метод быстрого вычисления поглощения многослойной системы посредством специальной номо-

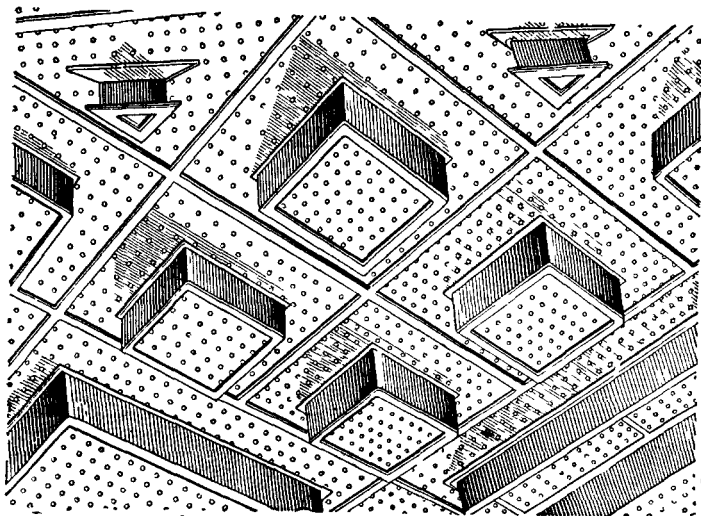


Рис. 12.

ние обратной задачи для сложных систем посредством постепенной подгонки параметров путём ряда проб. Таким путём, например, найдены параметры 4-слойной системы с поглощением $\alpha > 0,9$ в диапа-

зоне от 100 гц до 4000 гц . Частотная характеристика α дана на рис. 11.

В результате всей совокупности упомянутых выше работ была выяснена полная возможность устройства резонансного поглотителя, обеспечивающего достаточно малое отражение звука и элиминирующего эхо.

Начало войны в 1941 г. задержало широкое развитие работ по резонансным звукопоглотителям и внедрение их в практику. Двухслойный звукопоглотитель был осуществлён на потолке в большой студии Дома Звукозаписи в Москве (рис. 12). Измерения, произведённые в 1945 г. С. Т. Тер-Осипянцем, показали, что поглощение оказалось близким к ожидаемому согласно расчёту.

§ 6. РЕЗОНАНСНЫЕ ЗВУКОПОГЛОТИТЕЛИ В ДИФFUЗНОМ ЗВУКОВОМ ПОЛЕ ПОМЕЩЕНИЯ.

Разобранные выше случаи поглощения звука резонансным поглотителем относятся к нормальному падению звука. При наклонном падении звука под углом ϑ на поглотитель с отдельными резонансными ячейками для расчёта α_ϑ можно воспользоваться формулой, вытекающей из работ Рейли и Пёрриса²³

$$\alpha_\vartheta = 1 - \left| \frac{\frac{Z}{\Sigma} \cos \vartheta - \rho c}{\frac{Z}{\Sigma} \cos \vartheta + \rho c} \right|^2 =$$

$$= \frac{4R_1 \cos \vartheta}{(R_1 \cos \vartheta + 1)^2 + \cos^2 \vartheta (kM_1 - \operatorname{ctg} kL)^2}, \quad (5)$$

где $Z = R + jY$ — импеданс на площади ячейки одного резонатора при нормальном падении звука; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$; λ — длина волны; $R_1 = \frac{R}{\Sigma \rho c} = \frac{r}{\rho c} \cdot \frac{\Sigma}{\sigma}$ — среднее безразмерное активное сопротивление на единицу площади поглотителя, выраженное в единицах ρc , где ρ — плотность воздуха и c — скорость звука в воздухе, а r — коэффициент трения пористого материала. Величина M_1 представляет собой среднюю безразмерную массу на единицу поверхности, а L — глубину резонансного слоя. Резонансный максимум поглощения будет получаться при всех углах падения на одной и той же частоте, но величина его будет различна; она будет тем больше, чем ближе величина $\frac{R}{\Sigma \rho c} \cos \vartheta = R_1 \cos \vartheta$ к единице. Если, как это приходится делать в широкополосных поглотителях, величина R_1 имеет порядок 3—4, максимум поглощения получится при очень косом угле падения.

Средний коэффициент поглощения определится по формуле Пэриса

$$\bar{\alpha} = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \alpha_{\vartheta} \cos \vartheta \sin \vartheta d\vartheta. \quad (6)$$

Подсчёт показывает, что если α_{ϑ} достигает максимума при углах порядка 70° — 80° , то $\bar{\alpha}$ будет несколько больше, чем α_0 при нормальном падении ($\vartheta = 0$).

Если перегородки между отдельными резонаторами отсутствуют, то получается другая разновидность резонансного поглотителя, который можно назвать «слоисто-резонансным» поглотителем. При нормальном падении звука свойства поглотителя с перегородками (отсеками) и без них одинаковы, но при наклонном падении они существенно разнятся. Как показано К. А. Виталем²⁴, выражение для α_{ϑ} слоисто-резонансного поглотителя получается из выражения типа (5), но с заменой глубины слоя L на $L \cos \vartheta$.

Выражение для α_{ϑ} имеет вид:

$$\alpha_{\vartheta} = \frac{4R_1 \cos \vartheta}{(R_1 \cos \vartheta + 1)^2 + [kM_1 \cos \vartheta - \operatorname{ctg}(kL \cos \vartheta)]^2}. \quad (7)$$

Резонансный максимум поглощения, согласно формуле (7), получается при различной частоте для каждого угла падения.

Вычисление α_{ϑ} и $\bar{\alpha}$ по приведённым выше формулам представляет не слишком сложную, но весьма трудоёмкую вычислительную задачу. Эти расчёты особенно интересны для простейших систем с одним слоем резонаторов, которые весьма удобны для строительной практики. Ниже приводятся результаты подобных расчётов для ряда поглотителей.

§ 7. РЕЗОНАНСНЫЕ ЗВУКОПОГЛОТИТЕЛИ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ ПРАКТИКИ.

Для целей строительной практики, в залах, театрах, студиях, кинотеатрах и т. п. обычно не требуется звукопоглотителей весьма высокой эффективности, однако, предъявляются требования хороших архитектурных и строительных показателей и возможности широко изменять акустические показатели для того, чтобы получить тот или иной эффект. Простейшие резонансные звукопоглотители, состоящие из одного слоя резонаторов, расположенного вдоль стены или потолка, представляют в этом отношении ряд преимуществ. Они могут быть осуществлены в форме весьма прочной конструкции лёгкого веса; особенно существенна прочность наружного слоя, состоящего из жёсткого листа с малыми отверстиями. Конструкции, примеры которых мы приводим далее, весьма просто осуществляются

и могут быть изготовлены на месте постройки. Конструкция поглотителя легко может быть сделана огнестойкой и не подвергается порче от сырости, грызунов и моли. Акустические показатели могут быть изменяемы по желанию проектанта в весьма широких пределах. Возможно сконструировать поглотитель для полосы низких, средних или высоких частот. Комбинируя эти типы, можно дать любые варианты частотной характеристики. Возможно также рассчитать и построить поглотитель с узкой полосой поглощения, предназначенный для исправления недостатков акустики, замеченных в помещении уже готовом или находящемся в стадии отделки и акустической подгонки.

Решение обратной задачи для диффузного звукового поля, т. е. нахождение параметров поглотителя по заданной частотной характеристики, представляет задачу чрезвычайной сложности, пути решения которой, в общем виде, пока не удаётся наметить. Поэтому приходится

прибегать к способу пробных расчётов по приведённым выше формулам, в результате чего можно, в конце концов, найти конструктивные параметры (глубину резонаторов L , расстояние между ними a , диаметр отверстий d и коэффициент трения r), удовлетворяющие заданным требованиям к частотной характеристике поглощения. Этот путь является крайне громоздким и неприятным для практиков, ведущих строительство студий, театров и т. п. Поэтому мы наметили²⁵ принципиально иной путь решения задачи, чрезвычайно упрощающий её и позволяющий дать приёмы технических расчётов, доступные для неспециалистов по акустике.

Возможно заранее выбрать несколько типов частотных характеристик поглощения, подходящих для решения основных архитектурно-акустических задач, и, затем, дать пути конструктивного их осуществления (посредством резонансных поглотителей), обеспечивающие получение подобных характеристик. На рис. 13 изображены, например, выбранные таким образом характеристики широкополосного поглотителя для низких частот (ЗП—3б) или для высоких частот (ЗП—4а). Обе эти характеристики соответствуют величине удельного активного сопротивления $R_1 = 4$ и оказываются удобными для решения ряда задач на практике. Если взять $R_1 < 4$, то характеристика поглощения получается с более резким и более высоким

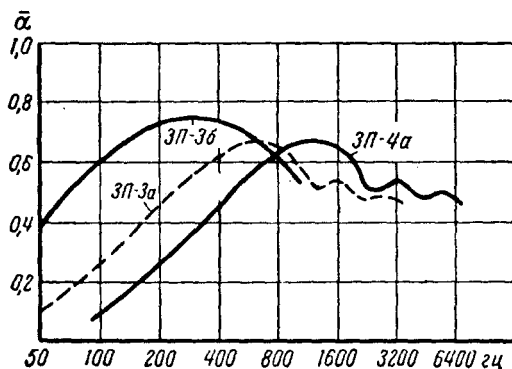


Рис. 13.

максимумом, если же взять $R > 4$, то характеристика сглаживается и понижается. И то, и другое является нежелательным, ввиду чего было решено остановиться на типовой характеристике с $R_1 = 4$ и использовать её в различных диапазонах частот, для чего необходимо

было указать соответствующие конструктивные параметры (L , a , d и r).

Для реализации первого вида характеристики ЗП-3б может быть применена конструкция, изображённая на рис. 14. Она имеет деревянный каркас, создающий отсеки через каждые 250 мм, которые преграждают распространение звука вдоль стены и обеспечивают работу всей системы в той области частот, где $\lambda > 250$ мм практически так, как если бы все резонансные ячейки были отделены друг от друга стенками. В отверстиях перфорации тонкого покровного листа ($l = 0,5$ мм) устанавливается ткань с удельным сопротивлением 5 мех. ом/см² (редкий ситец, миткаль). Эта конструкция не является единственной решающей задачу о получении характеристики, приводимой на рис. 13. Таких решений может быть дано

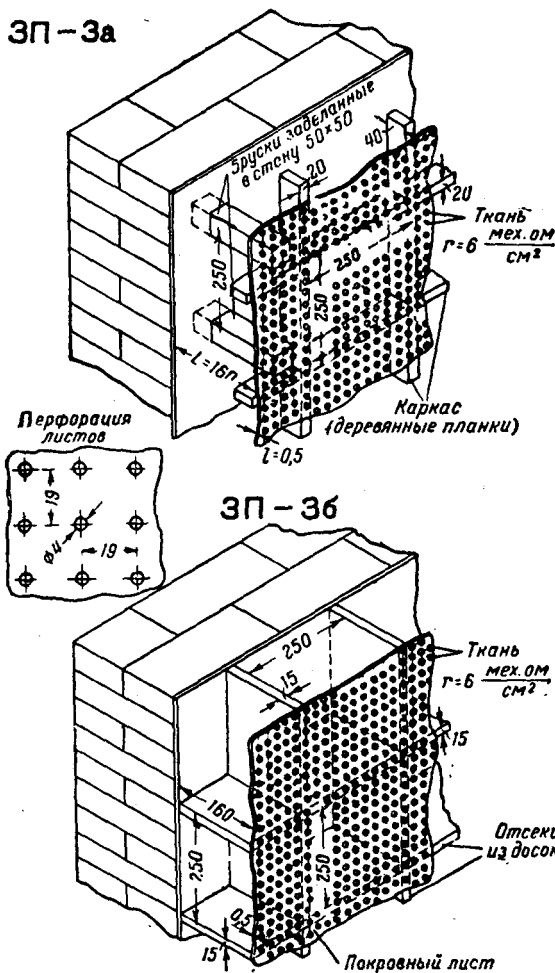


Рис. 14.

любое число в зависимости от сопротивления применённой ткани и толщины покровного листа, в котором делают отверстия. Все другие возможные варианты имеют ту же глубину слоя резонаторов $L = 160$ мм, величины же d и a могут быть рассчитаны на

основании простых формул или графиков, если задан коэффициент трения r и толщина передней стенки l^{26} . Так, например, ту же характеристику можно осуществить при покровном листе из фанеры толщиной в 5 мм (вместо 0,5 мм на рис. 14) и при помощи ткани с сопротивлением около 20 *мех. ом/см²* и при отверстиях диаметра в 11 мм, находящихся на расстоянии в 28 мм друг от друга.

Покровный

Если убрать отсеки в воздушной полости между покровным листом и стеной, как это показано на рис. 14 вверху, то характеристики поглощения сдвинутся в более высокую область частот, как это показано на рис. 13 (ЗП—За). Покровный лист в этом случае для увеличения жёсткости следует прикрепить к деревянному каркасу в форме крестовин.

Конструкция поглотителя с высокочастотной характеристикой ЗП—4а может быть реализована по схеме, показанной на рис. 14 (внизу), т. е. без отсеков. Расстояние покровного листа (толщиной 0,5 мм) от стены берётся в этом случае 80 мм, диаметр отверстия может быть взят, например, 5 мм и их взаимные расстояния—17 мм; ткань в отверстиях должна в этом случае иметь около 12 мх. ом/см². При использовании ткани с сопротивлением около 30 мх. ом/см², для получения той же характеристики придётся взять отверстия диаметром 22 мм на расстояниях 45 мм, при той же толщине листа и расстоянии его от стены.

Для получения избирательного поглощения с максимумом в узкой полосе 1—2 октав удобно применять конструкции резонансного поглотителя с отсеками. На рис. 15 показана примерная конструкция узкополосного поглотителя, для которого $\alpha > 0,5$ в диапазоне от 55 до 220 герц. Глубина резонаторов получается 160 мм, отверстия можно взять диаметром 30 мм на расстояниях 200 мм, ткань с сопротивлением 3 мех. ом/см². Абсорбенты этого типа позволяют легко получить высокое поглощение при сравнительно малых габаритах, что особенно важно в области низких частот, где обычные абсорбенты совершенно неэффективны.

Ориентировочные данные о размерах такого поглотителя можно получить по методу приближённого решения обратной задачи для

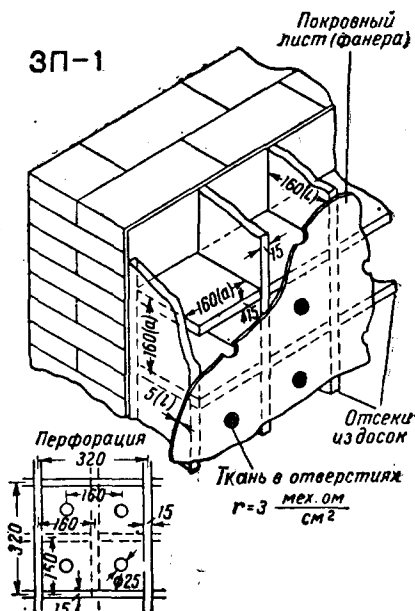


Рис. 15.

нормального падения звука¹⁹. Глубина слоя (L), диаметр отверстий резонаторов (d) и расстояния (a) между отверстиями могут быть рассчитаны, исходя из заданного поглощения $\alpha \geq \alpha_1$, в интервале частот от f_1 до f_2 по следующим формулам:

$$L_{с.м} = \frac{c}{4\pi} \frac{\alpha_1}{\sqrt{1-\alpha_1}} \cdot \frac{1-f_1/f_2}{f_1} \cong 2700 \frac{\alpha_1}{\sqrt{1-\alpha_1}} \frac{1-f_1/f_2}{f_1}, \quad (8)$$

$$d_{с.м} = \frac{4}{\pi^2 \rho} r \frac{\sqrt{1-\alpha_1}}{2-\alpha_1} \frac{1/f_1}{f_2/f_1-1} - \frac{4}{\pi} l \cong 330r \frac{\sqrt{1-\alpha_1}}{2-\alpha_1} \frac{1/f_1}{f_2/f_1-1} - \frac{4}{\pi} l, \quad (9)$$

$$\alpha_{с.м} = \sqrt{\frac{\pi \rho c}{4}} d_{с.м} \sqrt{\frac{2-\alpha_1}{r \alpha_1}} \cong 5,67 d_{с.м} \sqrt{\frac{2-\alpha_1}{r \alpha_1}}. \quad (10)$$

Максимум поглощения, равный $\alpha_m = \alpha_1(2-\alpha_1)$, получается при частоте $f_m = \sqrt{f_1 f_2}$. В этих формулах l — толщина покровного листа в см, r — удельное трение ткани, помещённой в отверстиях, в *мех. ом/см²*. Удельная величина активного сопротивления при этом задаётся равной $R_1 = \frac{2-\alpha_1}{\alpha_1}$, т. е. она всегда больше единицы. Соблюдение этого условия обеспечивает, при заданном поглощении на границах, наиболее широкий диапазон $f_2 - f_1$, в котором $\alpha \geq \alpha_1$, и при этом неравномерность частотной характеристики, определяющаяся при нашем способе расчёта величиной $\frac{\alpha_m}{\alpha_1} = 2 - \alpha_1$, практически будет весьма невелика (1,2—1,6).

Для получения $\alpha \geq 0,7$ в диапазоне от 50 до 70 герц при толщине покровного листа в 6 мм находим по формулам $L = 210$ мм, $d = 30$ мм и $a = 350$ мм; ткань в отверстиях берётся с сопротивлением всего 0,5 *мех. ом/см²* (марля или металлическая сетка). Для увеличения жёсткости передней стенки резонаторов такого большого размера (во избежание её соколебаний) можно сделать под ней рёбра жёсткости. Подобный абсорбент может с успехом ослаблять, например, шумы вентиляторов, обычно лежащие в очень низкой области частот. Узкополосные поглотители крайне ценны также для корректировки частотной характеристики студий и театров, так как позволяют элиминировать излишнюю реверберацию в той или иной области частот.

Любопытная модификация резонансного звукопоглотителя получается, если сопротивление осуществляется только за счёт трения воздуха в отверстиях. Расчёт показывает, что такого рода поглотитель даёт довольно удобное решение задачи для невысоких коэффициентов поглощения. Возможно, например, получить $\alpha \geq 0,3$ ($\alpha_m = 0,51$) в диапазоне от 50 до 100 гц посредством резонаторов, образующихся за листом тонкой жести ($l = 0,3$ мм), поставленным на расстоянии 10 см от стены, при наличии маленьких отверстий, диаметром всего 1 мм, отстоящих на 7 см друг от друга. Наличие довольно значительных поглощающих свойств у такой системы является на первый взгляд несколько неожиданным.

Коэффициент поглощения в диффузном звуковом поле для узкополосных поглотителей будет всегда несколько больше, чем положено в формулах (8), (9) и (10) для случая нормального падения. Дело в том, что при выводе этих формул, как указано выше, ставится условие $R_1 = \frac{2-a_1}{a_1}$. При выборе a_1 , в пределах 0,5—0,8, R окажется лежащим в пределах от 3 до 1,5. Следовательно, согласно указанному выше условию $R_1 \cos \vartheta = 1$, максимальное поглощение будет получаться не при $\vartheta = 0$, а при косых углах падения, и средний диффузный коэффициент будет больше, чем a_0 .

Отверстия резонаторов могут быть сделаны не круглыми, а прорезаны в форме щелей, прямоугольников, звёздочек и т. п. (рис. 16) и расположены не по квадратной решётке, а по какому-нибудь узору. При сохранении той же суммарной площади отверстий $N\sigma$ на единицу площади поглотителя получится приблизительно тот же коэффициент α , независимо от формы отверстий.

При практическом выполнении резонансных звукопоглотителей существенное значение может играть колебание передней стенки, покрывающей резонаторы, если она недостаточно жёстко укреплена. На первый взгляд кажется, что стенка является тяжёлой системой, и скорость её колебаний под действием звука не может достигать значительных величин, однако, объёмная скорость, даваемая стенкой, т. е. произведение скорости на площадь (Σ) может оказаться в некоторых случаях (лёгкая стенка, очень малые и редкие отверстия) того же порядка, как и объёмная скорость через отверстие площади (σ). В результате колебания стенки окажут существенное влияние на поведение всей системы.

Возможность влияния колебаний стенки на поглощение можно было предполагать ещё на основании теоретических соображений Винтергерста³⁰, относящихся к влиянию на поглощение звука твёрдого каркаса пористого материала, и экспериментальных работ Э. Майэра² и Лауффера²⁹. В 1941 г. Малюжинец³¹ подсчитал импеданс свободновисящего перфорированного листа и показал, что инерционные свойства такой системы, определяющие прохождение звука через неё, зависят не только от массы (m_1) воздуха в отверстиях (в основном присоединённой массы), но также и от массы (m_2) стенки (экрана), приходящейся на одно отверстие. Общая акустическая масса, которая определяет инерционные свойства системы, находится из выражения:

$$M = \frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2}, \quad (11)$$

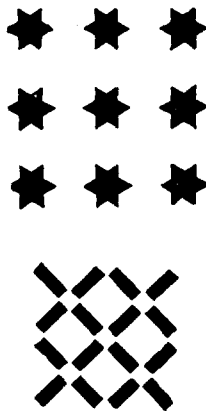


Рис. 16.

где $M_1 = \frac{m_1}{\sigma^2}$ и $M_2 = \frac{m_2}{\Sigma^2}$ — акустическая масса воздуха в отверстии площади σ и акустическая масса куска стенки площади Σ , приходящейся на одно отверстие. Таким образом, масса системы состоит как бы из параллельного соединения масс M_1 и M_2 («звуковой гриб») и оказывается меньше, чем одна масса в отверстии. Это должно приводить в тех случаях, когда M_1 и M_2 одного порядка, к значительному повышению резонансной частоты системы.

Передняя стенка резонаторов, применяемых в резонансных звукопоглотителях, не является свободно висящим экраном, она жёстко закрепляется по краям на некоторой рамке. Тем не менее, стенка под действием звукового давления может быть приведена в колебания как упругая мембрана. Влияние таких соко-

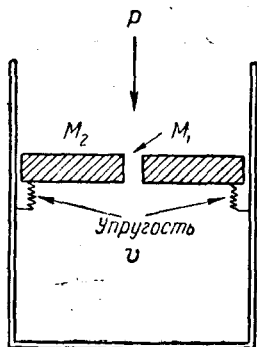


Рис. 17.

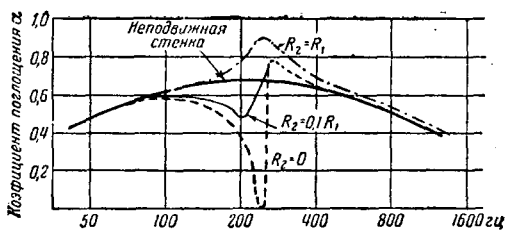


Рис. 18.

лебаний передней стенки резонатора на поглощение звука разобрано мною в недавней теоретической работе⁸². Задача идеализована предположением, что вся передняя стенка резонатора колеблется, как плоская жёсткая пластинка-поршень, не изгибаясь; элемент упругости предположен сосредоточенным лишь по краям пластины (рис. 17). Задача решается путём составления лагранжевых уравнений системы, причём интересной её особенностью является то обстоятельство, что кинетическая энергия присоединённой массы отверстия является функцией относительной скорости стенки и воздуха в отверстии, а не абсолютной скорости воздуха; то же относится и к рассеянной на трение в отверстии энергии. Результирующее выражение для импеданса резонансного звукопоглотителя с податливой стенкой довольно сложно и потому здесь не приводится.

Как частный случай при весьма большой упругости закрепления пластины, получается уже детально разобранный выше случай резонансного поглотителя¹². При упругости, равной нулю, получается случай, разобранный Малюжиным⁸¹.

Полученные мной формулы позволили проанализировать также и случай, когда резонанс стенки лежит в области, близкой к собственной частоте резонансного звукопоглотителя. На рис. 18 представлен резуль-

тат расчёта коэффициента звукопоглощения системы, рассчитанной на поглощение $\alpha > 0,6$ от 100 до 400 *гц*. Такая система может быть реализована посредством резонаторов с передней стенкой из железа толщиной 0,5 *мм*, отстоящей от стены на 33 *см* при ячейках площади $a^2 = 2,6 \times 2,6 \text{ см}^2$ и отверстиях диаметра $d = 0,4 \text{ см}$, прикрытых тканью с коэффициентом трения $r = 3 \text{ мех. ом/см}^2$.

Предполагая, что резонансная частота стенки лежит при 214 *гц*, т. е. как раз в центре диапазона поглощения, можно вычислить далее импеданс и поглощение системы. Параметр, характеризующий трение в пластине, может быть определён только экспериментально из декремента затухания, что и было сделано на модели. Вычисление, иллюстрированное на чертеже рис. 18, проведено для трёх различных параметров трения (выраженных в акустических омах): $R_2 = 0$; $R_2 = 0,1 R_1$ и $R_2 = R_1$, где R_1 — параметр трения в отверстии резонансного звукопоглотителя. Величина $R_2 = 0,1 R_1$ ближе всего к величине, найденной экспериментально. Из рис. 18 видно, что при $R_2 = 0$ поглощение имеет резкий провал до нуля вблизи резонансной частоты пластины; при $R_2 = 0,1 R_1$, кривая α идёт до резонанса пластины ниже, а после него выше, чем для жёстко закреплённой пластины; при $R_2 = R_1$, вся кривая идёт выше. Поскольку отдельные ячейки резонансного звукопоглотителя практически конструируются не строго тождественно (особенно в отношении условий закрепления передней стенки), то можно ожидать существенного различия в резонансных частотах и параметрах трения отдельных ячеек. В среднем, для большого числа ячеек, можно полагать, что соколебания стенки не будут вызывать значительных отклонений от расчётов, сделанных в предположении абсолютно жёсткого закрепления, как это делается в приведённых выше формулах для практических расчётов.

Для того чтобы соколебания стенки практически не влияли на поглощение резонансной системы, достаточно сделать собственную частоту стенки, примерно, на октаву выше частоты резонатора, для чего стенка должна быть достаточно жёстко закреплена.

Изложенные в этом обзоре данные являются результатом многолетней работы (1936—1945 гг.) большого коллектива, всем участникам которого я пользуюсь случаем принести мою искреннюю благодарность.

ЛИТЕРАТУРА.

1. W. Sabine. Collected Papers on Acoustics, Harvard Univ. Press, Cambridge USA, 1927.
2. E. Meyer. El. Nachr. Techn., 13, вып. 3, 1936.
3. C. W. Glover. Practical Acoustics for the constructor, London, 1933.
4. E. Wintergerst. ZS. d. VDI, 77, 91, 1933.
5. С. Н. Ржевкин. ЖТФ, 6, 2103, 1936; Techn. Phys. 3, 1, 1936.
6. М. С. Анцыферов. ЖТФ, 6, 2118, 1936.
7. С. Н. Ржевкин. Труды Акуст. Комиссии ОН АН СССР, сб. 3, 17, 1939.

8. E. H. Bedell. J. Acoust. Soc. Am. 8, 118, 1936.
 9. G. V. Bekesy. Ann. d. Phys 19, 665, 1934.
 10. W. Wisotsky. ZS. f. Hochfreq.
 11. Г. Д. Малюжинец. Доклад на засед. Акуст. Комиссии АН СССР, декабрь 1936.
 12. С. Н. Ржевкин. Докл. АН, 18, 25, 1938.
 13. Г. Д. Малюжинец. Инф.-тех. бюлл. СДС № 5—6, 32, 1941.
 14. W. Zeller, Akust. ZS. 3, 32, 1938.
 15. V. Jordan. Akust. ZS. 5, 77, 1940.
 16. Gigli. Alta Frequenza, 9, 717, 1940; реф. Akust, ZS. 7, 79, 1942.
 17. С. Н. Ржевкин и С. Т. Тер-Осипянц. ЖТФ, 11, 149, 1941; J. of Physics, 4, 45, 1941.
 18. В. С. Нестеров. Диссертация ФИАН, 1943.
 19. С. Н. Ржевкин. Докл. АН, 22, 568, 1939.
 20. В. С. Нестеров. ЖТФ, 9, 1927, 1939; 10, 617, 1940.
 21. В. С. Нестеров. Докл. АН, 31, вып. 3, 1941.
 22. В. А. Фок. Докл. АН, 31, вып. 9, 1941.
 23. E. T. Paris. Proc. Roy. Soc. Lond (A) 115, 407, 1927.
 24. К. А. Виталь. ЖТФ, 10, 980, 1940.
 25. С. Н. Ржевкин и В. С. Нестеров. Труды конференции О-ва Радиотехники и Электросвязи за 1946 г.
 26. С. Н. Ржевкин, Г. Д. Малюжинец и С. Т. Тер-Осипянц. Отчёт Отдела Акустики Стр-ва Дворца Советов, 1937 г.
 27. E. Wintergerst. ZS. d. VDI, 76, 777, 1932.
 28. L. Sivian. J. Acoust. Soc. Am. 7, 94, 1935.
 29. H. Lauffer ZS. f. Hochfreq. 49, 9, 1937.
 30. E. Wintergerst. Schalltechnik 4, 85, 1931.
 31. Г. Д. Малюжинец. Отчёт Отд. Акустики Дворца Советов.
 32. С. Н. Ржевкин. ЖТФ, 16, 381, 1946.
-