АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том VII 1961 Вып. 2

ЗВУКОПОГЛОТИТЕЛИ С ПЕРФОРИРОВАННОЙ ПАНЕЛЬЮ

К. А. Велижанина

Приводится метод расчета характеристик звукопоглощения конструкции, состоящей из слоя пористого материала с воздушным промежутком за ним, покрытой со стороны падения звука перфорированной панелью. Показано, что характеристика звукопоглощения получается значительно более широкополосной, если возрастающая с частотой инерционность панели компенсируется в некоторой области отрицательной реактивной компонентой импеданца слоя.

Вопросу расчета звукопоглотителей, состоящих из слоя пористого материала, покрытого перфорированной панелью, посвящен ряд работ. Так, Болт [1] приводит номограммы, по которым можно подсчитать нормальный и статистический коэффициенты звукопоглощения подобной конструкции, если известен импеданц слоя и параметры панели (ее толщина, размеры отверстий и расстояние между ними). В этой работе, однако, не дано указаний, какими должны быть параметры панели для того, чтобы при данном импеданце материала получить оптимальную характеристику звукопоглощения.

В работе Ингарда и Болта [2] дан метод расчета звукопоглотителя с тонким слоем пористого материала, отстоящего на расстоянии L от жесткой стенки и покрытого перфорированной панелью. Приводятся характеристики коэффициента звукопоглощения, рассчитанные для определенных значений параметра θ, равного $rl/P\rho c$, и номограммы, позволяющие определить L, величину сопротивления на продувание r и толщину l слоя пористого материала для того, чтобы получить одну из приведенных характеристик в заданной полосе частот. Толщина панели и коэффициент перфорации P должны быть при этом заданы; величина ρc — волновое сопротивление воздуха. Вследствие того, что инерционным сопротивлением слоя пренебрегают, характеристики коэффициента звукопоглощения можно использовать только для сосредоточенных слоев пористого материала типа ткани или сетки. Следует также иметь в виду, что при акустических процессах активное сопротивление материала может заметно отличаться от величины сопротивления на продувание [3, 4].

Известно, что слой из пористого материала обеспечивает хорошее звукопоглощение, если в нем на толщине укладывается примерно не менее четверти длины волны. Поэтому в области высоких частот значительное звукопоглощение можно осуществить со слоями сравнительно небольшой толщины (порядка нескольких сантиметров). Однако использование таких слоев без покрытия их защитной перфорированной панелью, оказывается часто практически неприменимым. Наличие же панели ухудшает поглощение в области высоких частот.

В настоящей работе показано, каким должен быть импеданц слоя и параметры панели для того, чтобы при сочетании панели со слоем материала характеристика звукопоглощения такой конструкции получалась достаточно широкополосной.

Входной импеданц звукопоглотителя с перфорированной панелью можно приближенно положить равным сумме импеданца слоя на воздушном промежутке и импеданца панели. Последний мы полагаем чисто

инерционным, считая, что активными потерями, вносимыми отверстиями, можно пренебречь. Однако, как показано в работе Ингарда [5], отверстия панели, тесно примыкающей к слою пористого материала, могут дать заметную активную компоненту, обусловленную дополнительными потерями в пористом материале. Этот эффект сводится, практически, к нулю, если между слоем пористого материала и панелью имеется воздушный промежуток толщиной в один или более диаметра отверстия.

Реактивная компонента импеданца единицы площади жесткой перфорированной панели (выраженная в долях ρc — волнового сопротивления воздуха) равна*

$$Y_{\text{п}} = \omega \frac{\Sigma}{cK}, \tag{1}$$

где Σ — площадь панели, на которую приходится одно отверстие диаметра d (площадь ячейки), K — проводимость. Последняя вычисляется по формуле работы [6]:

$$K = \frac{\pi d^2}{l + \pi d/4\psi(\zeta)}. \tag{2}$$

Величина $\psi(\zeta)$ в формуле (2) представляет собой функцию Фока [7], зависящую от ζ — отношения диаметра отверстия d к диаметру ячейки D. При $\zeta \leqslant 0{,}2$ величина $\psi(\zeta) \simeq 1$.

Если импеданц слоя пористого материала с воздушным промежутком за ним обозначить через $Z_{\text{сл}} = R_{\text{сл}} + jY_{\text{сл}}$, то входной импеданц этого же слоя, но покрытого со стороны падения звука перфорированной панелью, будет

$$Z = R_{\text{сл}} + i\left(Y_{\text{сл}} + \frac{\omega}{c}\frac{\Sigma}{K}\right) = R + jY.$$

При постоянном значении $R_{\text{сл}}$ коэффициент звукопоглощения при нормальном падении будет иметь максимальное значение, если реактивная компонента импеданца Z равна нулю, т. е.

$$Y_{\text{сл}} = -\frac{\omega}{c}\frac{\Sigma}{K}. \tag{3}$$

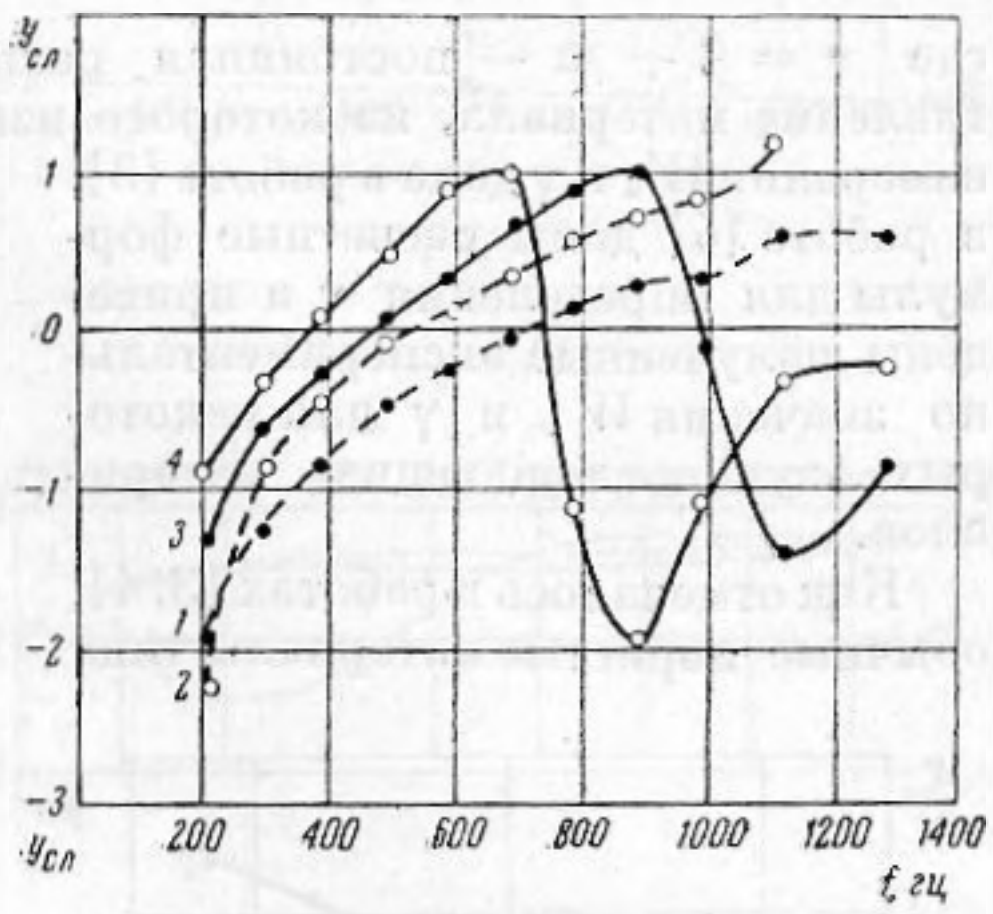
Если отрицательная реактивная компонента импеданца слоя пористого материала будет по абсолютной величине близка к положительной реактивной компоненте, то общая реактивная компонента будет $\simeq 0$ и коэффициент звукопоглощения будет иметь значительную величину. Для выяснения возможности такой компенсации была исследована зависимость от частоты реактивной компоненты реальных пористо-волокнистых материалов.

Импеданц слоя пористого материала при низких частотах определяется главным образом упругостью воздуха в порах и реактивная компонента импеданца велика и имеет отрицательный знак; поэтому коэффициент звукопоглощения на низких частотах мал. Уменьшения реактивной компоненты (а следовательно, увеличения коэффициента звукопоглощения) можно достичь либо увеличением толщины слоя, либо размещением этого же слоя на некотором расстоянии от жесткой стенки. На фиг. 1 дана $Y_{\text{сл}}$ — реактивная компонента импеданца слоя стекловойлока толщиной $h = 6$ *см* в зависимости от частоты при размещении слоя на расстоянии L от жесткой стенки для случаев L равного: *1*—5 *см*, *2*—8 *см*, *3*—10 *см*, *4*—15 *см*. Из фиг. 1 видно, что с изменением частоты (при некоторой фиксированной толщине воздушного промежутка) отрицательная реактивная компонента уменьшается по абсолютной величине до нуля, переходит затем к положительным значениям, достигает некоторого максимума, снова уменьшается до нуля и опять переходит в отрицательную область, увеличиваясь

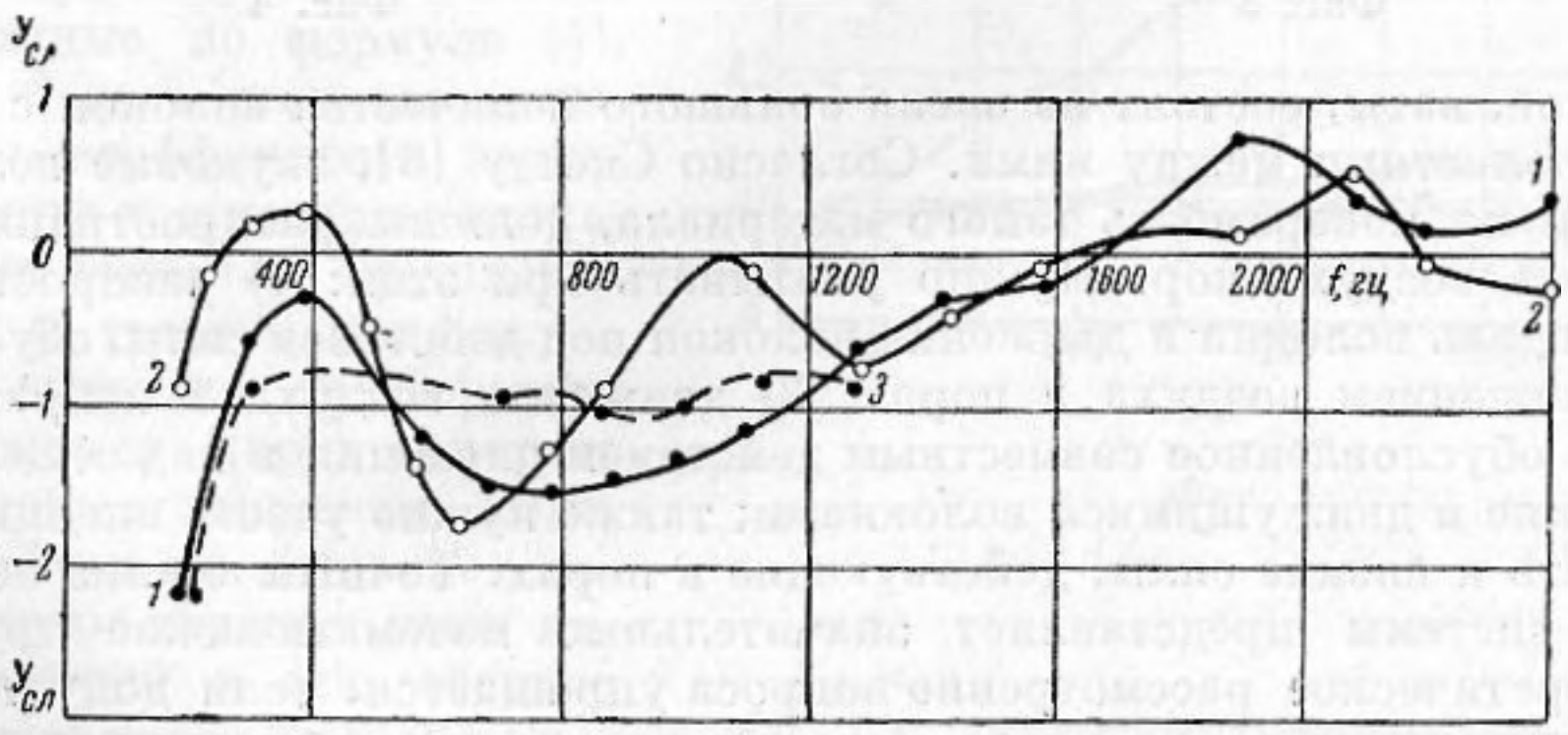
* Все величины в дальнейшем выражаются в долях ρc.

по абсолютной величине с частотой. Та же качественно картина наблюдается для слоев различной толщины. Таким образом, в некоторой полосе частот условие (3) приближенно выполнить можно.

Более подходящей с точки зрения выполнения условия (3) оказалась зависимость реактивной компоненты импеданца от частоты для импортного материала — микролита, представляющего собой мягкий стекловойлок, подклеенный снизу стеклотканью с очень высоким сопротивлением на продувание (1—2 тысячи *мех. ом/см*^{2}). Эта зависимость иллюстрируется на фиг. 2 для слоя микролита толщиной $h = 4$ *см*, помещенного на расстоянии L равном: *1*—5 *см*, *2*—8 *см* от жесткой стенки. Для того, чтобы выяснить, обусловлена ли данная зависимость действием стеклоткани в сочетании со стекловойлоком или действием самого стекловойлока, был измерен импеданц слоя микролита без стеклоткани (фиг. 2, *3*) и, затем, импеданц слоя отечественного стекловойлока толщиной $h = 4$ *см* на воздушном промежутке $L = 8$ *см*, к нижней поверхности которого была подклеена стеклоткань от микролита (фиг. 3, *1*). Кривая *2* на фиг. 3 относится к слою без стеклоткани. Такая же закономерность зависимости реактивной компоненты импеданца от частоты, показанная на фиг. 4, получается для слоя из штапельного стекловолокна марки А толщиной, равной 4 *см* для $L = 0$ (*1*); 5 *см* (*2*), 8 *см* (*3*) со стеклотканью снизу и $L = 5$ *см* (*4*), 8 *см* (*5*) без стеклоткани.



Фиг. 1



Фиг. 2

Мы предположили, что стеклоткань имеет инерционный импеданц $j\omega M/\rho c$, где M — масса стеклоткани на единицу площади. В случае правильности этого предположения масса, полученная из взвешивания стеклоткани, должна совпадать со значением M, полученным из измерений реактивной компоненты импеданца стеклоткани на воздушном промежутке в четверть длины волны. При сопоставлении этих значений мы получили совпадение с точностью 7%, что свидетельствует о правильности сделанного предположения. Стеклоткань, обладающая положительной инерционностью, оказывает заметное влияние на реактивную компоненту импеданца слоя. Активная компонента импеданца слоя, подклеенного

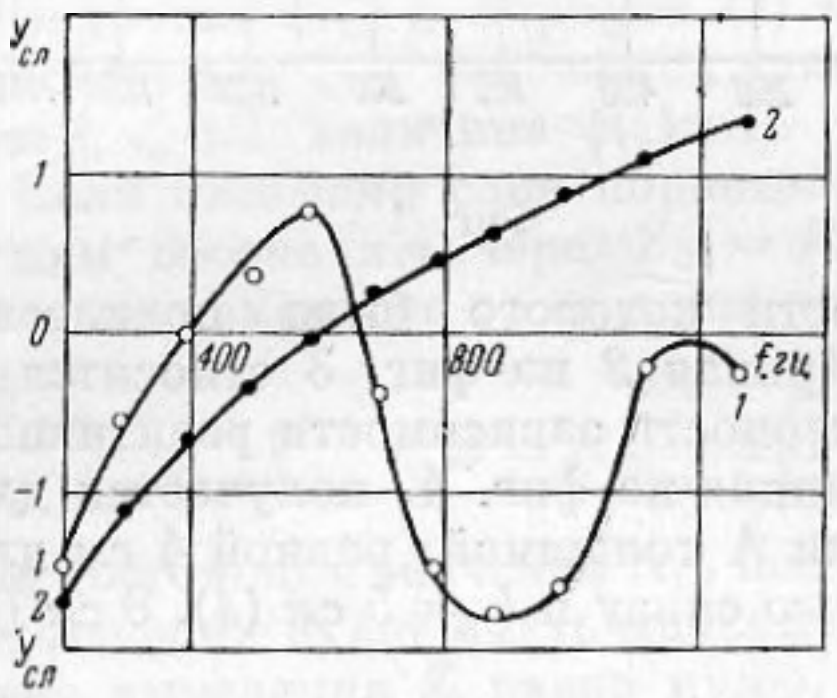
стеклотканью, как правило, имеет максимум при некоторой частоте, обусловленной, по-видимому, резонансом колебаний стеклоткани.

Импеданц слоя пористого материала $Z_{сл}$, ограниченного снизу известным выходным импеданцем Z_2, можно подсчитать по формуле (3):

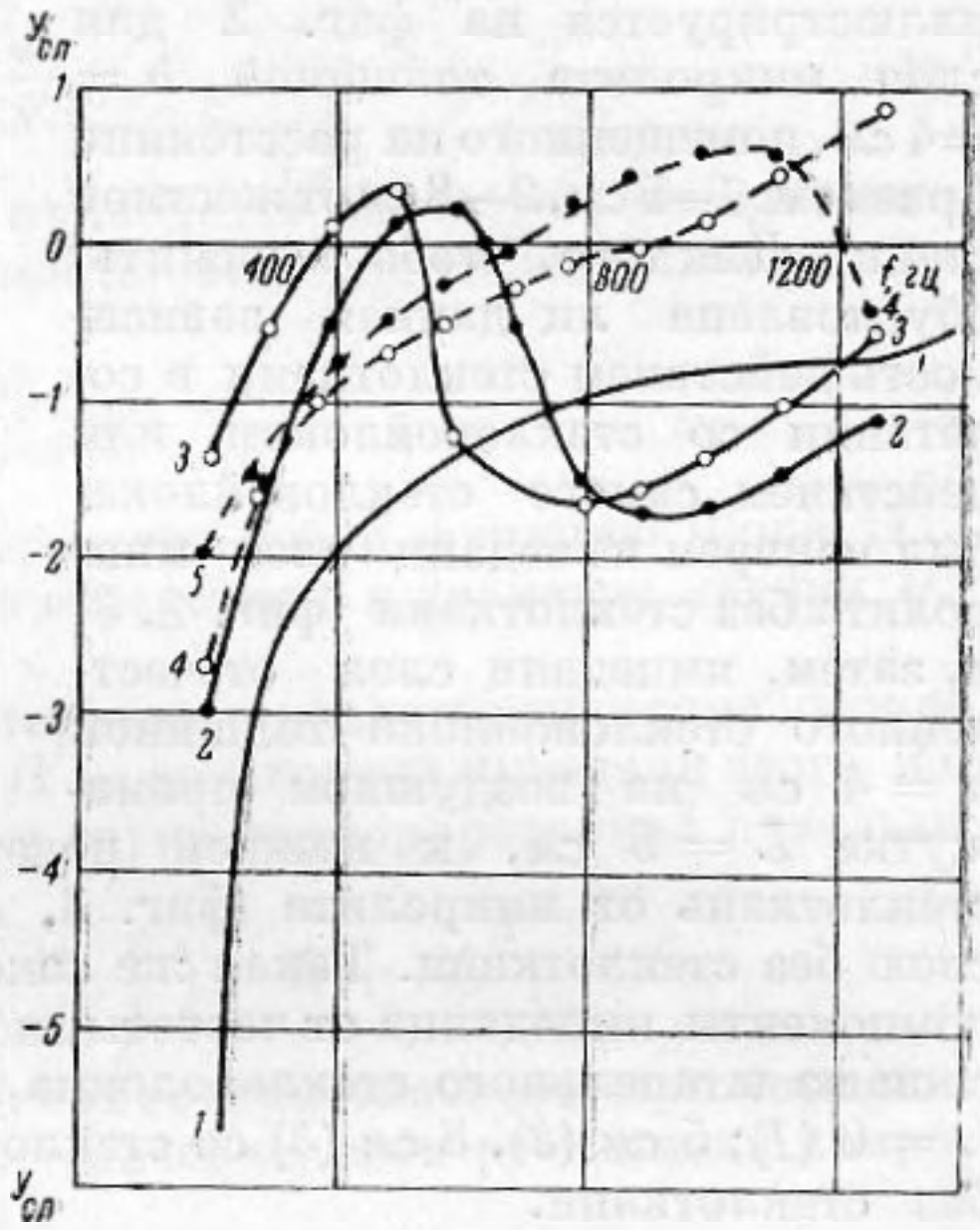
$$Z_{сл} = W_1 \frac{Z_2 \operatorname{ch} \gamma h + W_1 \operatorname{sh} \gamma h}{Z_2 \operatorname{sh} \gamma h + W_1 \operatorname{ch} \gamma h}, \tag{4}$$

где $\gamma = \beta + j\alpha$ — постоянная распространения, W_1 — волновое сопротивление материала, из которого изготовлен слой толщиной h. Методика измерения W_1 и γ дана в работе [3], в работе [4] даны расчетные формулы для определения γ и приведены полученные экспериментально значения W_1 и γ для некоторых звукопоглощающих материалов.

Как отмечалось в работах [3, 4], обычные пористые материалы типа



Фиг. 3



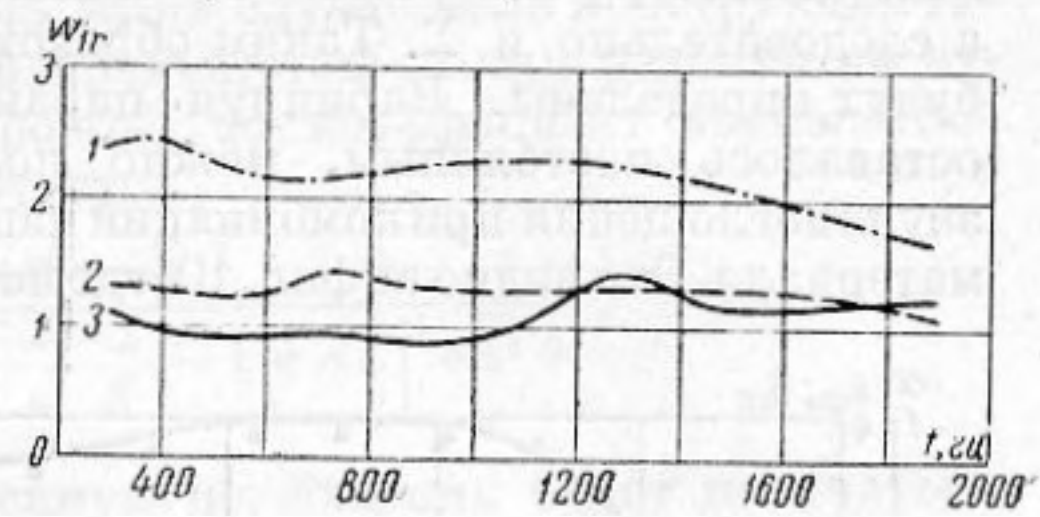
Фиг. 4

войлоков, ваты, состоят из очень большого количества волокон с воздушными полостями между ними. Согласно Скотту [8], звуковые волны, падающие на поверхность такого материала, должны распространяться не только в воздухе пор. Нужно учитывать при этом: 1) распространение звука вдоль волокна и движение волокон под действием силы, обусловленной движением воздуха в порах; 2) движение воздуха в неправильных порах, обусловленное совместным действием давления в падающей звуковой волне и движущимися волокнами; также нужно учесть инерцию, сжимаемость и вязкие силы, действующие в порах. Точный анализ поведения такой системы представляет значительные математические трудности.

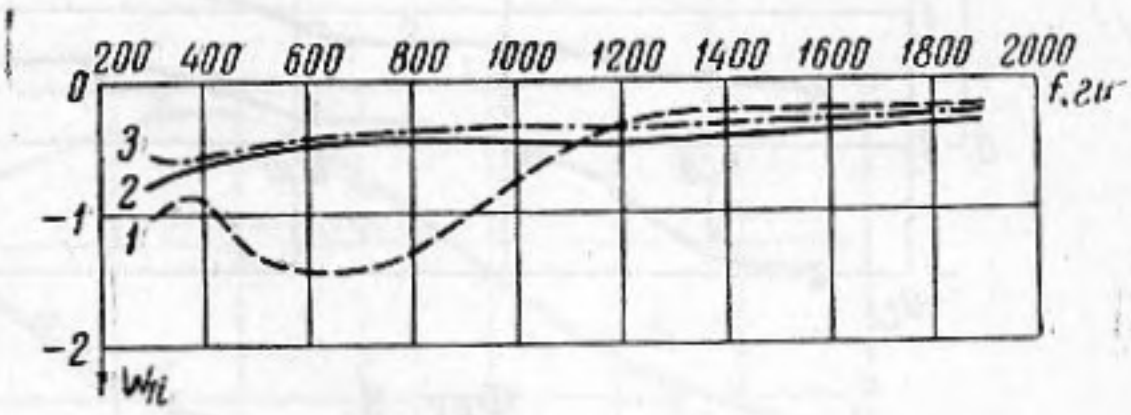
Теоретическое рассмотрение вопроса упрощается, если допустить, что распространение звука вдоль волокон как целых проводников не имеет места вследствие их малой жесткости. Можно считать, что колебание волокон изменяет эффективную инерционность воздуха и вводит в уравнение движения диссипативный член пропорциональный скорости. Тогда уравнение движения запишется в обычном виде, но плотность при этом будет комплексной и равной $\frac{m}{P}\rho - j\frac{\sigma}{\omega}$, где m — отношение эффективной плотности воздуха к обычной, P — пористость, σ — постоянная сопротивления и ω — циклическая частота. Как было показано, мнимая часть плотности при очень низких частотах совпадает со значением σ/ω, где σ измерялось на специальной установке как отношение перепада давления к объемной скорости. Хорошее совпадение результатов подсчета импеданца по значениям γ и W с экспериментальными данными также подтверждает правильность предположений, высказанных в работе [8].

Результаты измерения акустических параметров микролита, штапельного стекловолокна марки А и материала ВТ-4 даны в виде графиков зависимости активной (фиг. 5) и реактивной (фиг. 6) компоненты волнового сопротивления, постоянной затухания (фиг. 7) и волнового числа (фиг. 8) от частоты. Кривые *1* относятся к микролиту, *2* — к штапельному стекловолокну марки А, *3* — к материалу ВТ-4. Из фиг. 5 видно, что активная часть волнового сопротивления этих материалов лежит в пределах 1—2 единиц ρc; волновое число увеличивается с частотой (что указывает на наличие дисперсии). Из фиг. 8 можно видеть, что скорость звука при низких частотах в 2—3 раза меньше скорости звука в воздухе и приближается к ней при частотах порядка 800—1000 *гц*. На фиг. 9 показаны значения активной R (*1*) и реактивной Y (*2*) компонент импеданца слоя штапельного стекловолокна марки А, толщиной $h = 4$ *см* на воздушном промежутке $L = 8$ *см*, подсчитанные по формуле (4). Кривая *3* дает результаты вычисления коэффициента звукопоглощения α; экспериментальные точки показаны кружками, точками и треугольниками.

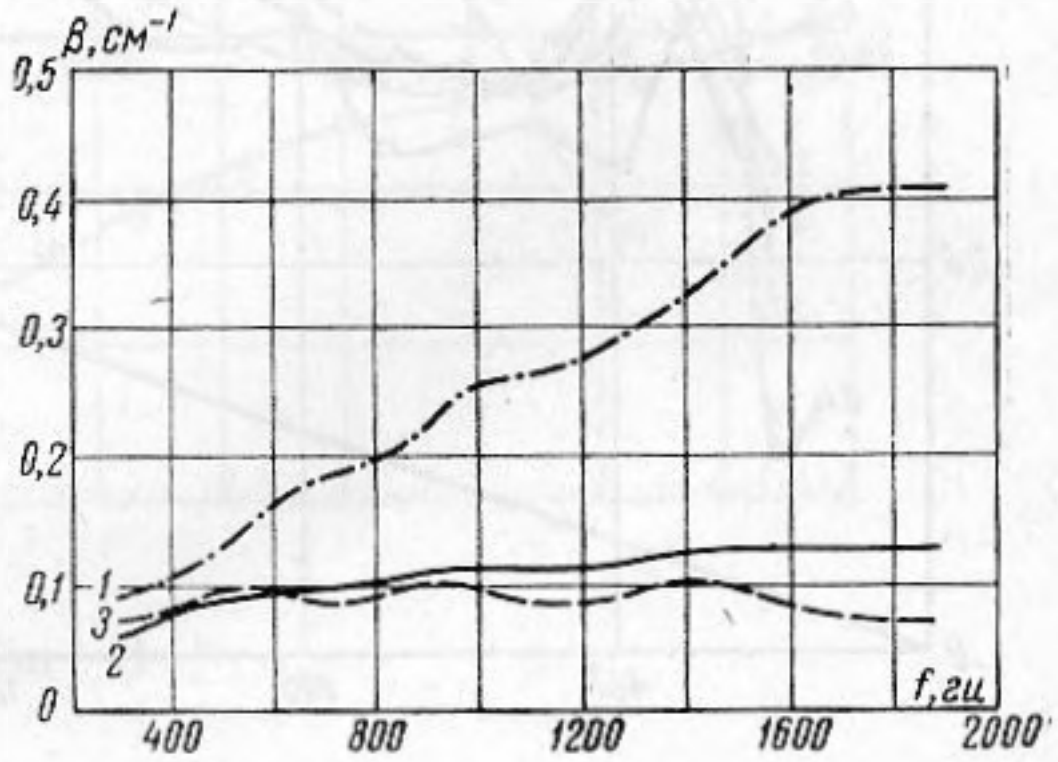
Как вытекает из формулы (1), частотная характеристика реактивной компоненты импеданца панели представляет собой прямую, тангенс угла наклона которой к оси абсцисс (оси частот) равен $2\pi\Sigma/cK$. Следовательно, наклон прямой нужно выбирать так, чтобы возрастающая с частотой инерционность панели компенсировалась отрицательной реактивной компонентой импеданца слоя на воздушном промежутке в возможно более широкой полосе частот. Для данного наклона прямой получается, согласно формуле (1), вполне определенное значение Σ/K. Задавая толщину панели l и желае-



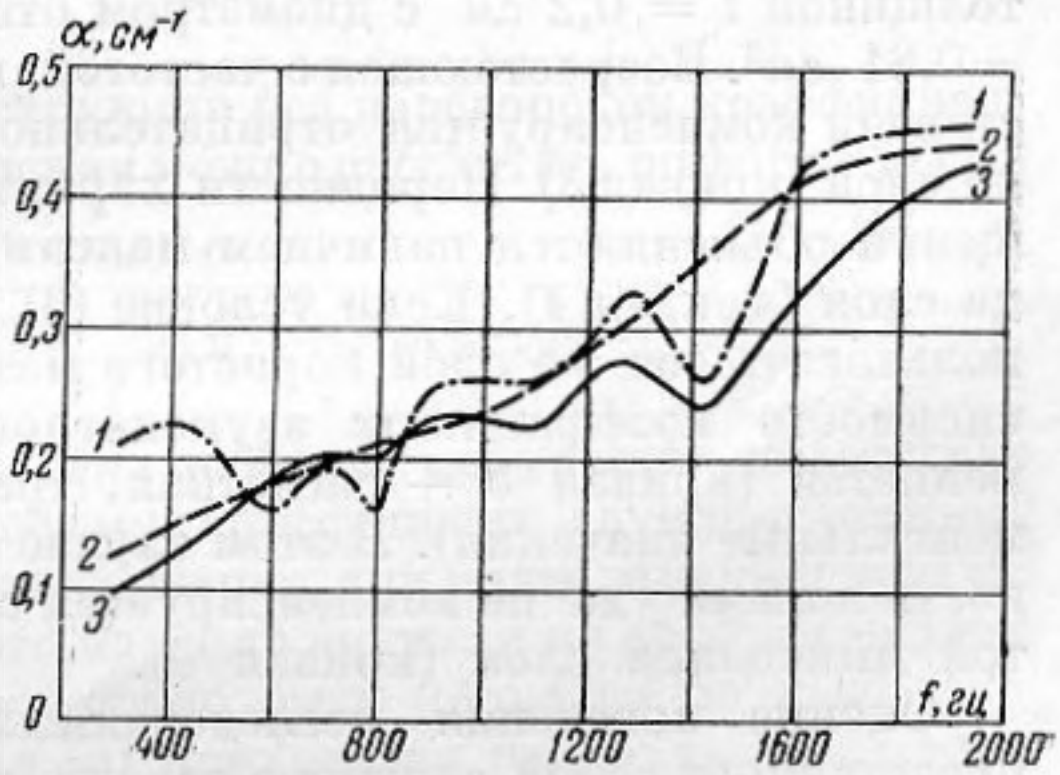
Фиг. 5



Фиг. 6

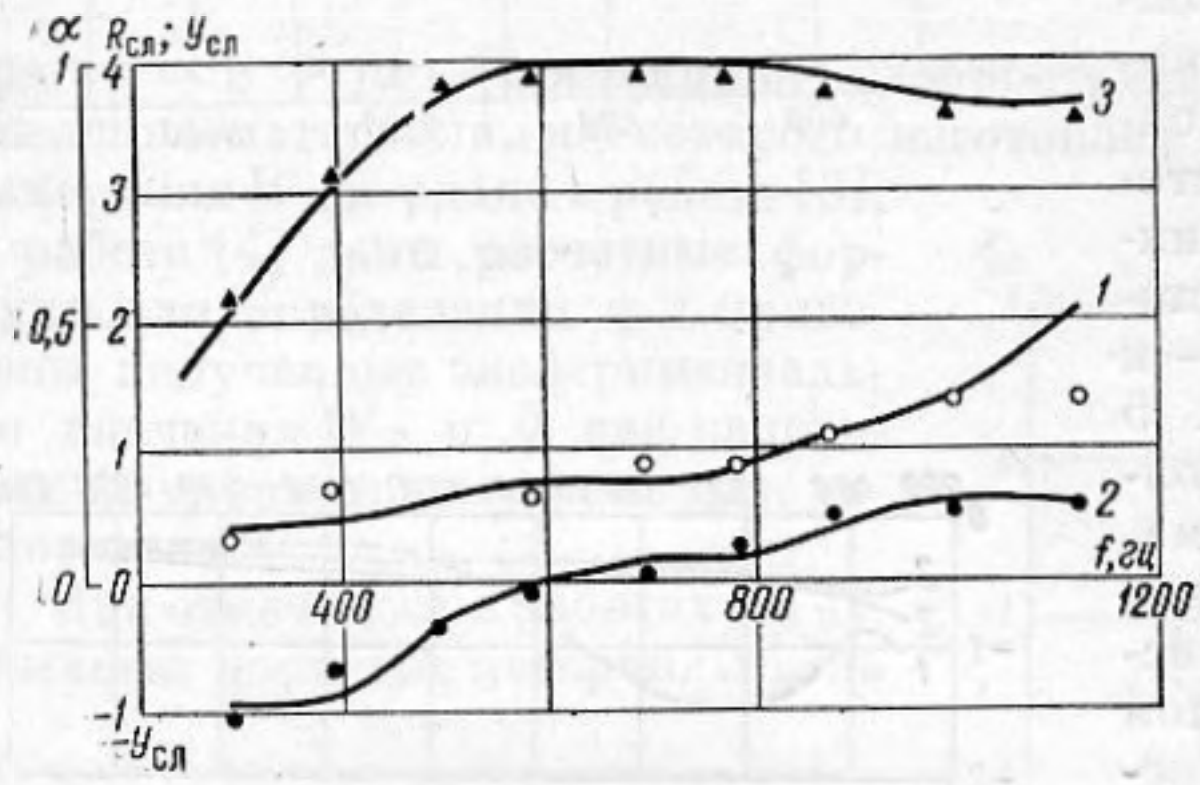


Фиг. 7

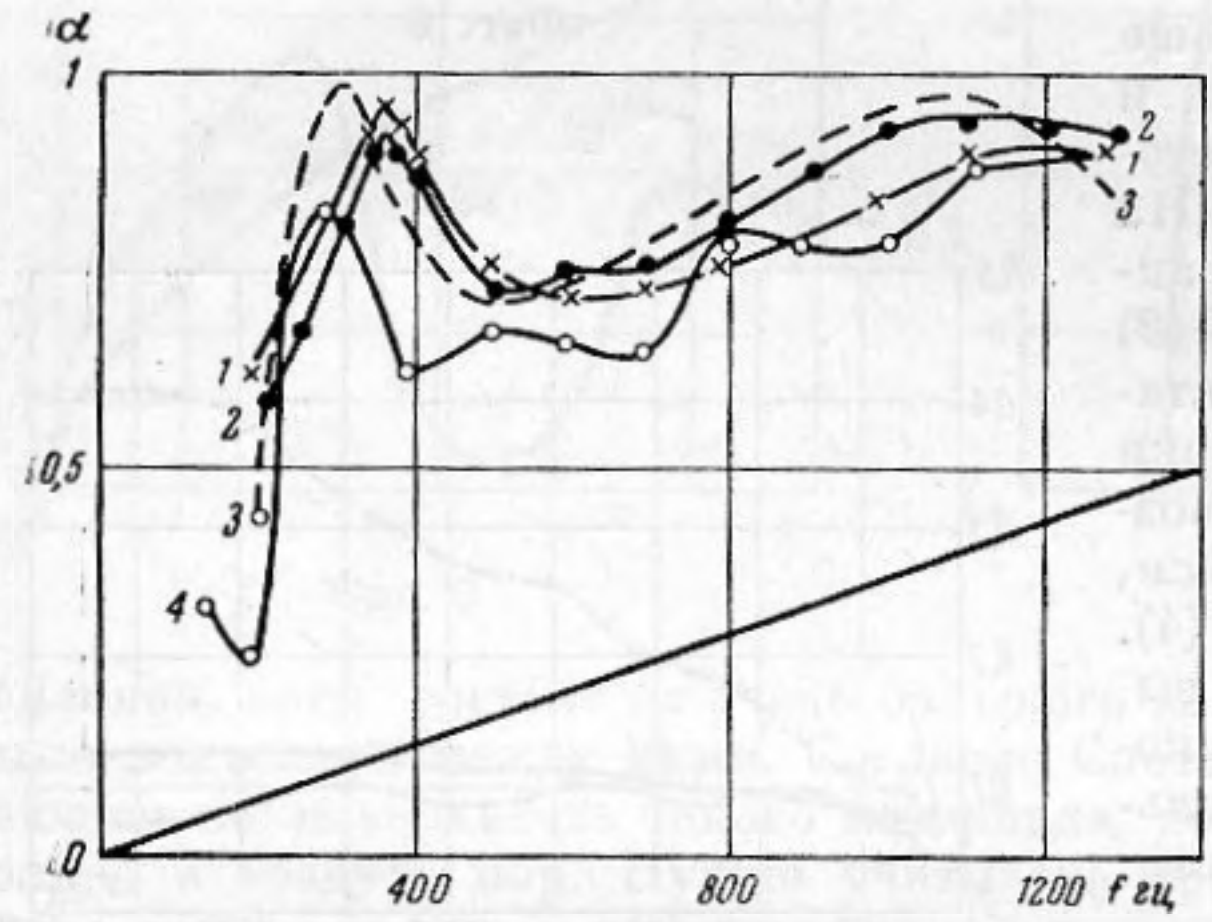


Фиг. 8

мый диаметр отверстия d, можно из формулы (2) определить K, а следовательно и Σ. Таким образом, все необходимые параметры панели будут определены. Варьируя параметры панели l, d и Σ так, чтобы Σ/K оставалось постоянным, можно получить одинаковые характеристики звукопоглощения при комбинации панелей с одним и тем же слоем пористого материала. Это видно из фиг. 10, где показаны характеристики коэффициента звукопоглощения слоя микролита при $h = 4$ *см* на воздушном промежутке 5 *см* в сочетании с двумя панелями, имеющими $\Sigma/K = 7{,}8$.



Фиг. 9



Фиг. 10

Если взять панели толщиной $l = 0{,}4$ *см* с диаметром отверстий $d = 0{,}5$ *см* и $d = 0{,}8$ *см*, то из значения $\Sigma/K = 7{,}8$ получается в первом случае $\Sigma = 2{,}6$ *см*^{2} и во втором $\Sigma = 4$ *см*^{2}. Значения коэффициента звукопоглощения, относящиеся к первому (кривая *1*) и второму (кривая *2*) вариантам панели в сочетании со слоем микролита, практически одинаковы и хорошо отвечают ходу теоретической кривой (*3*). Кривая *4* показывает коэффициент звукопоглощения для слоя микролита на воздушном промежутке $L = 5$ *см*, но без панели.

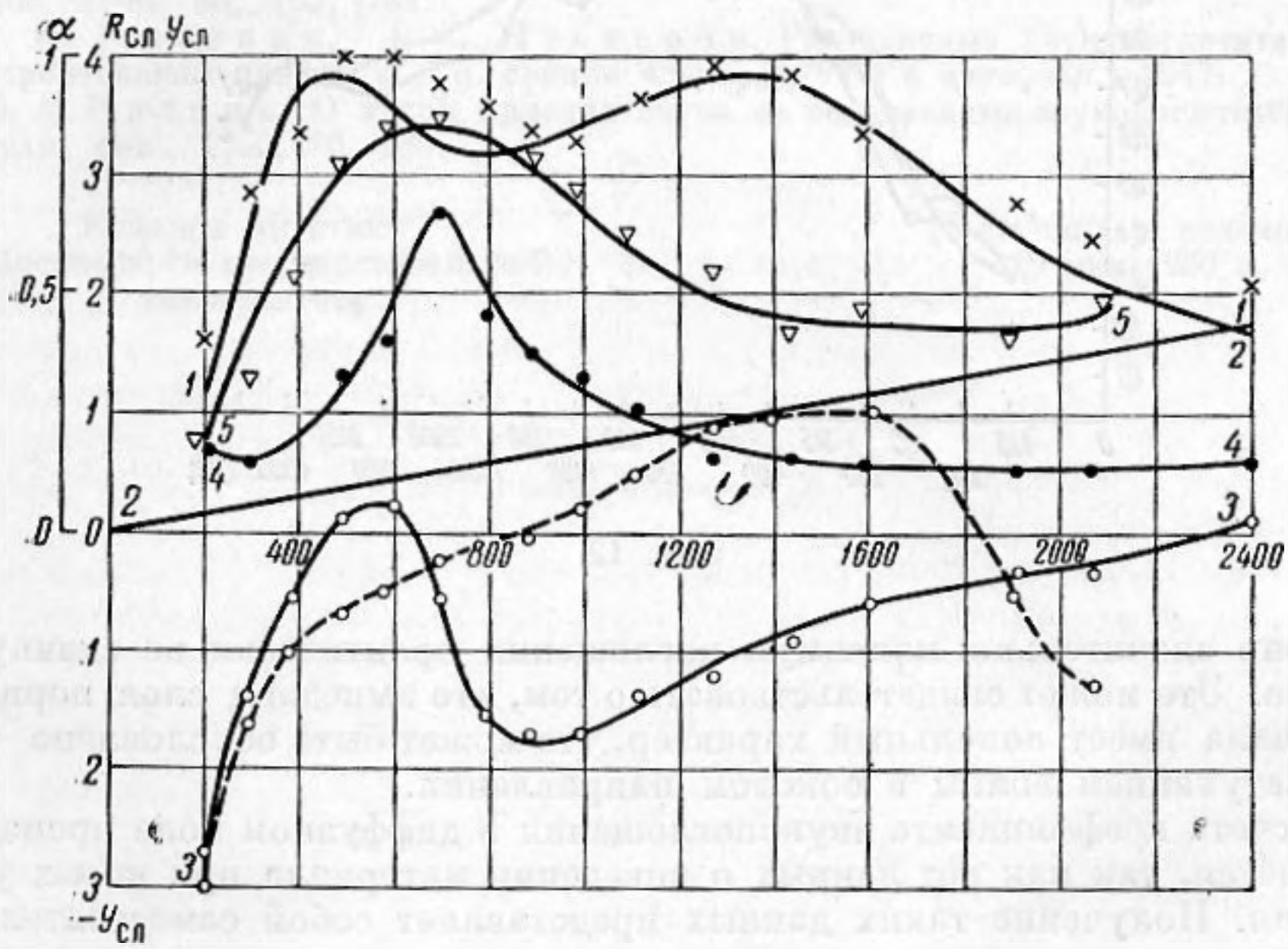
На фиг. 11 показана рассчитанная характеристика коэффициента звукопоглощения (кривая *1*, крестики — экспериментальные значения) для слоя штапельного стекловолокна марки А, толщиной $h = 4$ *см* на $L = 5$ *см* с панелью, параметры которой были определены, исходя из условия (3). Из выбранного наклона прямой (*2*) получается $\Sigma = 4$. Для панели толщиной $l = 0{,}2$ *см* с диаметром отверстий $d = 0{,}35$ *см*, мы имеем $\Sigma = 0{,}81$ *см*^{2}. Возрастающая с частотой инерционность панели в некоторой степени компенсируется отрицательной реактивной компонентой импеданца слоя (кривая *3*). Неровности характеристики коэффициента звукопоглощения объясняются наличием максимума активной компоненты импеданца слоя (кривая *4*). Если условие (3) не выполнено (а это будет, если использовать тот же слой пористого материала, но без стеклоткани), то зависимость коэффициента звукопоглощения от частоты значительно изменяется (кривая *5* — расчетная, треугольниками обозначены экспериментальные значения). В этом случае возрастающая с частотой инерционность панели уже не компенсируется отрицательной реактивной компонентой импеданца слоя (кривая *6*).

Оценка поведения исследованных конструкций в диффузном поле представляет собой сложную задачу, так как не имеется достаточных данных о поведении материалов при наклонном падении. Используя данные

работы [9], а также [2], можно сказать, что в случае, если конструкция такова, что пористый слой и воздушный промежуток за ним разбиты на отдельные секции посредством перегородок, то коэффициент звукопоглощения в функции угла падения ϑ будет

$$\alpha(\vartheta) = \frac{4R\cos\vartheta}{(R\cos\vartheta + 1)^2 + \left[\frac{\omega}{c}\frac{\Sigma}{K} - \operatorname{ctg} KL\right]^2 \cos^2\vartheta},$$

откуда видно, что резонансный максимум поглощения будет получаться при одной и той же частоте для всех углов падения (при условии $\frac{\omega}{c}\frac{\Sigma}{K} - \operatorname{ctg} KL = 0$), но величина его будет различна. Она будет тем больше, чем ближе $R\cos\vartheta$ к единице.



Фиг. 11

В этом случае значение среднего коэффициента звукопоглощения в диффузном поле, определяемое соотношением

$$\alpha_д = 2\int_0^{\pi/2} \alpha(\vartheta)\sin\vartheta\cos\vartheta\, d\vartheta \tag{5}$$

может быть рассчитано [3]. Для конструкций без перегородок коэффициент звукопоглощения в функции угла падения можно рассчитать по формуле [10]

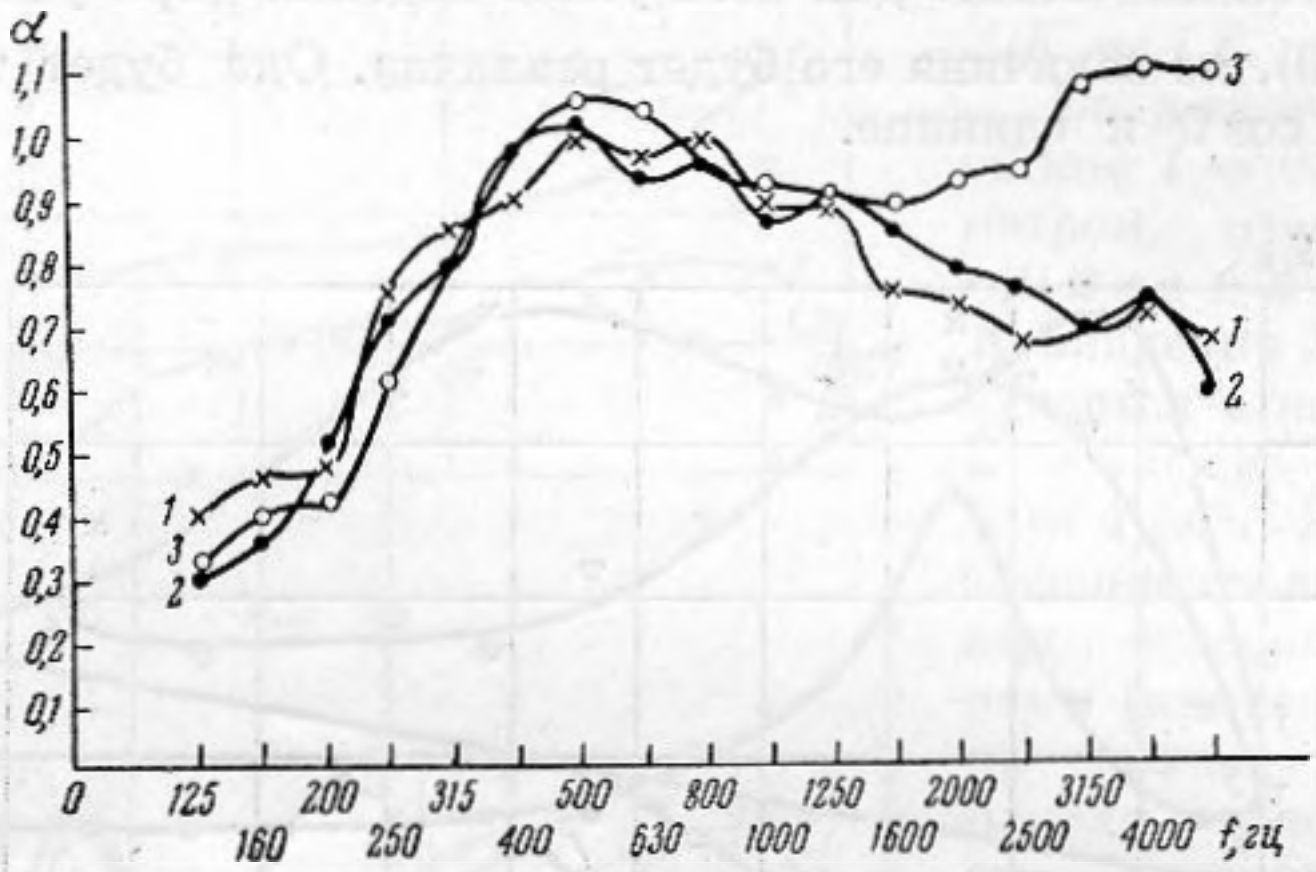
$$\alpha(\vartheta) = \frac{4R\cos\vartheta}{(R\cos\vartheta + 1)^2 + \left[\frac{\omega}{c}\frac{\Sigma}{K}\cos\vartheta - \operatorname{ctg}(KL\cos\vartheta)\right]^2},$$

откуда видно, что при увеличении угла падения получается повышение основной резонансной частоты. Поэтому коэффициент звукопоглощения в диффузном поле имеет максимум поглощения при более высокой частоте по сравнению со случаем нормального падения звука, и на характеристике коэффициента звукопоглощения не должно быть провалов до нуля.

Для последнего случая интеграл (5) приходится оценивать численно. На фиг. 12 приведены характеристики коэффициента звукопоглощения,

измеренного в реверберационной камере для конструкций, состоящих из дюралюминиевых панелей толщиной $l=0{,}2$ *см* (кривая *1*) и $l=0{,}06$ *см* (кривая *2*) с отверстиями диаметра $d = 0{,}35$ *см* и расстоянием между ними $a = 0{,}9$ *см* (кривая *1*) и $d = 0{,}65$ *см* и $a = 1{,}8$ *см* (кривая *2*). За панелями помещен слой толщиной $h = 4$ *см* из штапельного стекловолокна марки А, который помещен на расстоянии $L = 5$ *см* от жесткой стенки. Кривая *3* относится к случаю, когда материал не покрыт панелью.

Сопоставляя кривую *1* на фиг. 12 с кривой *1* на фиг. 11, можно видеть, что зависимости коэффициента звукопоглощения разнятся между собой



Фиг. 12

не очень значительно: максимум поглощения практически не сдвинут по частоте. Это может свидетельствовать о том, что импеданц слоя пористого материала имеет локальный характер, что может быть обусловлено сильным затуханием волны в боковом направлении.

Расчета коэффициента звукопоглощения в диффузном поле произвести не удается, так как нет данных о поведении материала при косых углах падения. Получение таких данных представляет собой самостоятельную задачу.

Расчет же характеристик коэффициента звукопоглощения при нормальном падении с нашей точки зрения кажется целесообразным, так как позволяет качественно оценить звукопоглощающие свойства конструкции в диффузном поле.

Выводы

1. При конструировании звукопоглотителей, состоящих из слоя пористого материала конечной толщины с воздушным промежутком за ним, покрытых перфорированной панелью, необходимо учитывать не только активную, но и реактивную компоненту импеданца слоя.

2. Для получения широкополосной характеристики звукопоглотителя необходимо, чтобы в заданном диапазоне частот реактивная компонента импеданца панели, возрастающая с частотой, по возможности компенсировалась отрицательной реактивной компонентной импеданца слоя (см. условие (3)). Приближенного выполнения этого условия можно достичь размещением под слоем пористого материала тонкой стеклоткани с очень высоким сопротивлением на продувание (играющей роль тонкой пластинки) и соответствующим подбором глубины воздушного промежутка.

В заключение выражаю глубокую признательность С. Н. Ржевкину и К. М. Иванову-Шиц за полезную дискуссию по результатам работы, а также И. В. Лебедевой, А. А. Крайновой и В. Москалеву за помощь, оказанную при выполнении работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. H. Bolt. On the design of perforated facings for acoustic materials. J. Acoust. Soc. America, 1947, **19**, 5, 917—921.
2. U. Ingard, R. H. Bolt. Absorption characteristic of acoustic material with perforated facings. J. Acoust. Soc. America, 1951, **23**, 5, 533—540.
3. К. Цвиккер, К. Костен. Звукопоглощающие материалы. М., ИЛ, 1952.
4. З. Н. Баранова, К. А. Велижанина. Акустические параметры некоторых звукопоглощающих материалов. Акуст. ж., 1957, **3**, 2, 99—103.
5. U. Ingard. Perforated facing and sound absorption. J. Acoust. Soc. America, 1954, **26**, 2, 151—154.
6. В. С. Нестеров. Экспериментальное исследование проводимости круглого отверстия в перегородке, поставленной поперек трубы. Докл. АН СССР, 1941, **9**, 879—882.
7. В. А. Фок. Теоретическое исследование проводимости круглого отверстия в перегородке, поставленной поперек трубы. Докл. АН СССР, 1941, **31**, 9.
8. Scott. The absorption of sound in a homogenous porous medium. Proc. Phys. Soc., 1946, **58**, 165, 183.
9. С. Н. Ржевкин, В. С. Нестеров. Резонансные звукопоглотители для строительной практики. Тр. секции электроакуст. и звукозап., 1947.
10. К. А. Виталь. О косом падении звука на резонансные звукопоглотители. Ж. техн. физ., 1940, **10**, 980.

Кафедра акустики
Московского государственного
университета

Поступила в редакцию
19 мая 1960 г.