АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XIII 1967 Вып. 3

УДК 534.833.532.2

МАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ СЛОЕВ ИЗ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Н. Ф. Егоров

В настоящее время не представляется возможным выполнить теоретический расчет активных глушителей, имеющих сложную конфигурацию, таких, например, как судовые шахтные глушители [1]. Поэтому признано [2] наиболее целесообразным для определения акустических характеристик крупногабаритных глушителей такого рода использовать их масштабные модели.

Наиболее трудной задачей при моделировании глушителей является обеспечение подобия звукопоглощающих свойств облицовок натурного и модельного глушителей. Когда средой глушителя и его модели является воздух, условием акустического подобия таких облицовок служит равенство на сходственных частотах $f_н$ и $f_м$ их импеданцев [2]:

$$Z_м = Z_н | f_м = f_н / M_l, \tag{1}$$

где $M_l = d_м / d_н$ — масштаб моделирования, d — толщина звукопоглощающего слоя, индексы $_н$ и $_м$ показывают принадлежность величин соответственно к натурному и модельному глушителям.

Импеданц звукопоглощающего слоя состоит из активной R и реактивной X составляющих, поэтому соблюдение условия (1) сводится к выполнению на сходственных частотах следующих равенств:

$$R_м = R_н \quad и \quad X_м = X_н. \tag{2}$$

Составляющие импеданца R и X звукопоглощающих материалов сложным образом зависят от ряда величин, характеризующих акустические свойства этих материалов. Положение осложняется еще и тем, что большинство из этих величин, а следовательно R и X, являются функциями частоты.

В настоящее время при создании пористых звукопоглощающих материалов преобладают чисто эмпирические методы и управлять заданным образом характеристиками звукопоглощения таких материалов в большинстве случаев не удается. Поэтому подбор для модели глушителя материала облицовки, который бы удовлетворял условиям (2) во всем требуемом диапазоне сходственных частот, чрезвычайно труден.

Условие подобия (1) следует из волновой теории распространения звука в глушителях со звукопоглощающими облицовками, которая характеризует эти облицовки их импеданцами. Если рассматривать процесс распространения звука в таких глушителях с позиций статистической теории [3], то соотношения (2) могут быть заменены легче удовлетворяе-

мым условием — равенством на сходственных частотах коэффициентов звукопоглощения α облицовок натурного и модельного глушителей:

$$\alpha_{н} = \alpha_{м}. \tag{3}$$

На возможность подбора облицовки модельного глушителя по равенству на сходственных частотах коэффициентов звукопоглощения натурного и моделирующего слоев указывается в работах [2, 4].

Переход от условий (2) к равенству (3) означает отказ от учета фазовых соотношений в звуковом поле внутри глушителя. Это допустимо, поскольку в шумах аэродинамического происхождения, для ослабления которых обычно и применяются глушители, не наблюдается устойчивых фазовых соотношений. Сложность конфигурации глушителей (наличие поворотов, сужений и расширений) также обусловливает правомочность перехода к условию (3), так как она способствует образованию в глушителе нерегулярного звукового поля.

В работах [2, 4] отмечается, что структура материалов облицовок натурного и модельного глушителей должна быть одинаковой. Очевидно что проще всего это достигается использованием в модели материала примененного в натурном глушителе. Толщина моделирующего звукопоглощающего слоя при этом должна выбираться в соответствии с масштабом M_l. Ниже рассматривается возможность достижения подобия звукопоглощающих свойств слоев различной толщины из одного и того же волокнистого материала.

Для частотных характеристик звукопоглощения волокнистых слоев, прилегающих непосредственно к жесткой отражающей стенке, характерно плавное, без выбросов и провалов, нарастание коэффициента поглощения по мере увеличения в некоторых пределах частоты звука и толщины материала. При этом максимальное значение коэффициента звукопоглощения наблюдается на некоторой частоте f_m, которая может быть определена [5] по формуле Кремера:

$$f_m = c/4d\sqrt{k}, \tag{4}$$

где c — скорость звука в воздухе, d — толщина поглощающего слоя, k — структурный фактор звукопоглощающего материала.

Ввиду того, что отношение fd/c представляет собой критерий гомохронности H_0 [2] (толщина звукопоглощающего слоя принимается в рассматриваемом случае за характерный размер), формула (4) может быть написана так:

$$H_{0m} = f_m d/c = {}^1/_4\sqrt{k}. \tag{5}$$

Выражение (5) дает возможность определять значение критерия гомохронности H_{0m}, при котором коэффициент звукопоглощения имеет максимальное значение. При хаотическом расположении каналов пор, что обычно имеет место у волокнистых звукопоглощающих материалов, фактор $k = 3$[6] и, следовательно, $H_{0m} \approx 0{,}14$.

В области частот, расположенных выше f_m, коэффициент α остается приблизительно постоянным с некоторыми колебаниями относительно среднего для этой области частот значения [5].

Указанная зависимость звукопоглощения от частоты и толщины материала дает основание предположить, что при $H_0 \leqslant H_{0m}$ неизменность этого критерия будет обеспечивать получение одинаковых значений коэффициента α. Проверка этого предположения была произведена для материалов из капронового волокна ВТ-4 и ВТ-4с, а также материалов АТМ-1 и АТИМС из стекловолокна. Эти материалы чаще всего используются в глушителях в качестве звукопоглощающих облицовок. Толщины звуко-

поглощающих слоев в глушителях составляют обычно $50 \div 100$ *мм*. Предпочтительные значения масштаба M_l при моделировании глушителей лежат в пределах $1/10 \div 1/5$. Следовательно, минимальная толщина моделирующего слоя должна быть равна 5 *мм*.

Измерение коэффициентов звукопоглощения слоев с толщиной от 5 до 100 *мм* производилось в интерферометре типа 4002 фирмы «Брюль и Къер». Объемная плотность образцов различной толщины сохранялась в процессе измерений неизменной и равнялась соответственно 10, 25, 50 и 80 *кг/м*^{3} для материалов АТМ-1, ВТ-4с, ВТ-4 и АТИМС. Диапазон частот, в котором производились измерения, составлял 100—6300 *гц* для образцов с толщинами до 50 *мм* и 100—1600 *гц* для слоев 75 и 100 *мм*. В процессе измерений на наружную поверхность образцов накладывался перфорированный металлический экран толщиной 1,5 *мм*, который удерживал волокнистый материал в требуемом положении. Коэффициент перфорации экрана (отношение суммарной площади отверстий ко всей его площади) составлял приблизительно 25%. Такого рода экраны обычно используются в глушителях для обеспечения необходимой прочности звукопоглощающей конструкции и защиты волокнистых материалов от выдувания потоком воздуха или газа. Экспериментально установлено, что при коэффициенте перфорации, равном или большем 20%, такой экран является акустически прозрачным и не оказывает заметного влияния на характер затухания шума в глушителе [5]. В связи с этим один и тот же экран использовался при испытаниях как натурных (50—100 *мм*), так и моделирующих слоев (5—25 *мм*).

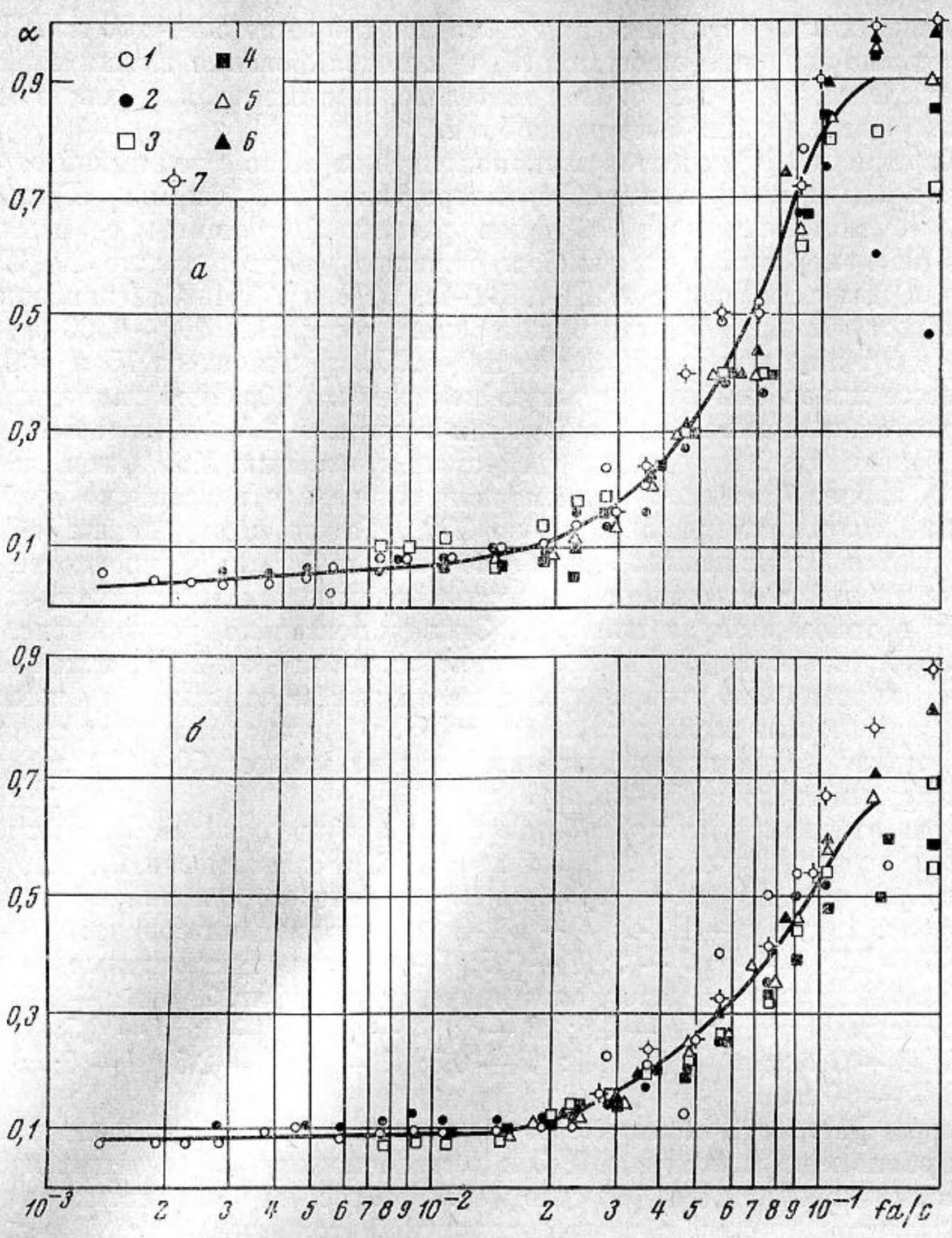
Результаты измерений обработаны, как это предложено Юдиным [2], в системе безразмерных координат $\alpha = \varphi(H_0)$. Зависимости коэффициента α от критерия H_0 для материалов из капронового волокна представлены на фиг. 1, где *а* — ВТ-4; *б* — ВТ-4с и толщина материала: *1* — 0,5; *2* — 1; *3* — 2,5; *4* — 4; *5* — 5; *6* — 7,5; *7* — 10 *мм*. Аналогичные данные для стекловолокнистых материалов приведены на фиг. 2, где *а* — АТИМС и толщина материала: *1* — 0,5; *2* — 1; *3* — 1,5; *4* — 3; *5* — 4,5; *6* — 6; *7* — 7,5; *8* — 9 *мм*; *б* — АТМ-1: *1* — 0,5; *2* — 1; *3* — 2,5; *4* — 4; *5* — 5; *6* — 7,5; *7* — 10 *мм*.

Данные фиг. 1 и 2 показывают, что значение H_{0m} для указанных материалов равно приблизительно 0,13 и достаточно хорошо согласуется с его расчетным значением по формуле (5). Разброс в результатах замеров коэффициентов α для образцов различной толщины при $H_{0m} \leqslant 0{,}13$ в большинстве случаев незначителен, поэтому в этой области значений критерия H_0 можно считать, что существует однозначная связь между этими двумя величинами. Это позволяет в области $H_{0m} \leqslant 0{,}13$ провести через точки, представляющие результаты измерения α для слоев толщиной от 5 до 100 *мм*, плавные кривые. Эти кривые можно назвать обобщенными частотными характеристиками указанных материалов.

Полученные зависимости нельзя распространить на значения $H_0 > 0{,}13$, т. к. в этой области коэффициенты звукопоглощения слоев различной толщины существенно отличаются друг от друга.

На основании полученных данных можно считать, что при использовании в качестве облицовки модельного глушителя волокнистого звукопоглощающего материала, применяемого в натурном глушителе, если толщина слоя взята в соответствии с масштабом моделирования, а плотность оставлена прежней, то подобие по коэффициентам звукопоглощения в этих глушителях обеспечивается на сходственных частотах в области значений критерия гомохронности 0,015—0,13.

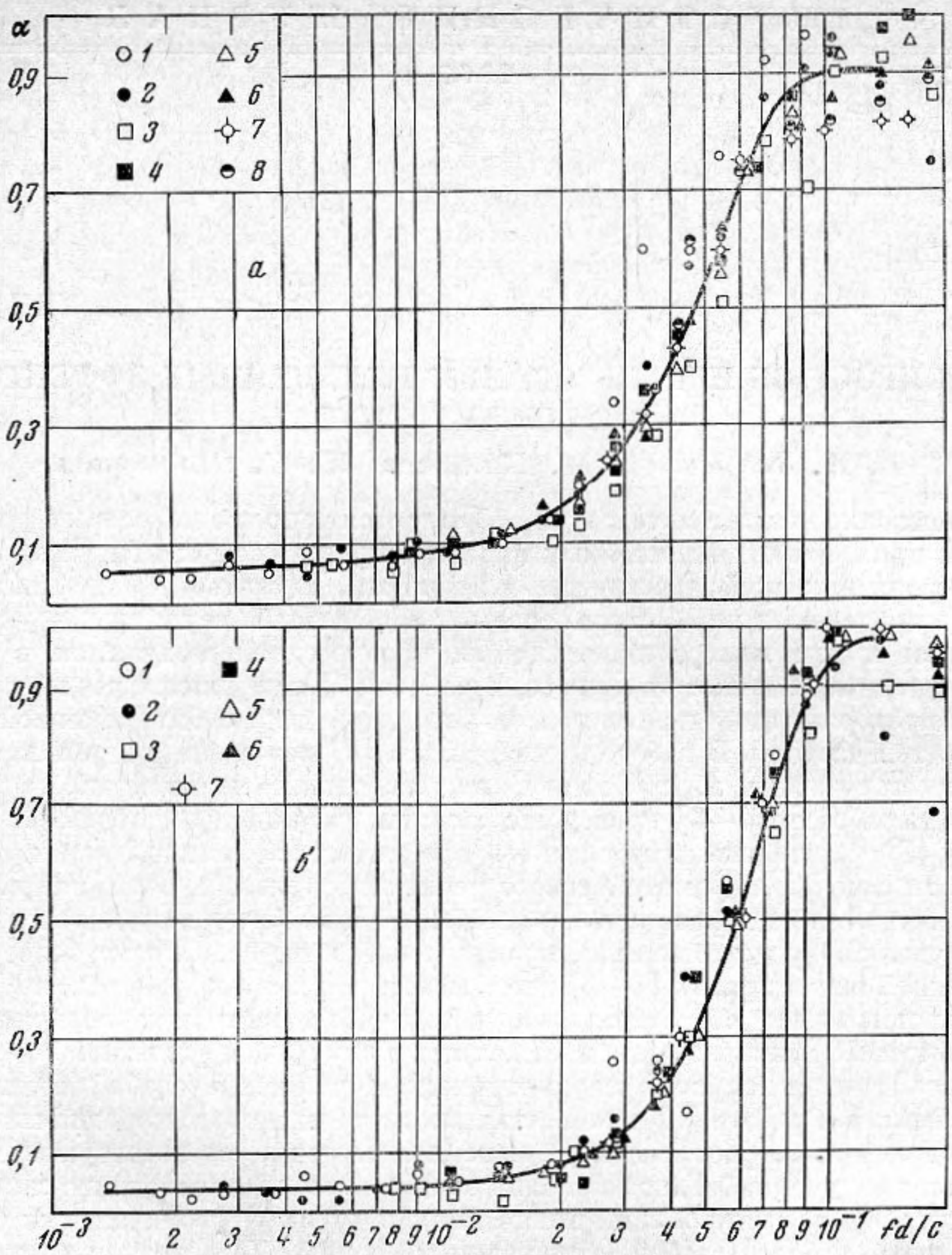
Следовательно [см. формулу (5)], в рассматриваемом случае подобие звукопоглощающих свойств облицовок натурного и модельного глушителей будет обеспечиваться приблизительно до 500 *гц* при толщине звукопоглотителя в натурном глушителе 100 *мм* и до 1000 *гц* в тех случаях, когда эта толщина равна 50 *мм*. При этом необходимо иметь в виду, что



Фиг. 1

масштаб моделирования не следует брать меньше, чем 1/10, а минимальная толщина моделирующего слоя должна составлять 5 *мм*. Переход к более малым моделям связан с целым рядом технических и методологических трудностей [5].

Ослабление глушителями сложной конфигурации частотных составляющих шума, лежащих выше 500 *гц*, достигается сравнительно легко. Поэтому основной интерес представляет определение эффективности таких глушителей на частотах ниже 500 *гц*, где получение требуемых величин ослабления шума связано с наибольшими трудностями. Проведенные исследования показали, что указанный способ обеспечения подобия звукопоглощающих свойств облицовок из волокнистых материалов позволяет довольно простым образом получать такое подобие как раз в области частот до 500 *гц*. Установлено также, что формула Кремера, написанная в виде выражения (5), позволяет для звукопоглощающих слоев из волокнистых материалов достаточно точно определить наибольшее предельное значение критерия гомохронности H_{om}, при котором связь между коэффициентами α облицовок различной толщины и критерием H_0 можно еще считать однозначной.



Фиг. 2

В заключение следует отметить, что построение обобщенных частотных характеристик может оказаться полезным также при сопоставлении звукопоглощающих свойств различных волокнистых материалов. Они дают более наглядное представление о зависимости коэффициента α от частоты и толщины слоя материала, чем обычные семейства частотных характеристик звукопоглощения.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. И. Клюкин. Борьба с шумом и звуковой вибрацией на судах. Л., Судпромгиз, 1961.
2. Е. Я. Юдин. Исследование шума вентиляторных установок и методы борьбы с ним. М., Оборонгиз, 1958.
3. А. И. Белов. Затухание звука в трубах с поглощающими стенками. Ж. техн. физ., 1938, 8, 8, 752—755.
4. И. К. Разумов. Исследование звукопоглощающих свойств материалов и эффективности различных глушителей с поглощающим слоем. Тр. научной конференции по борьбе с шумами и действию шума на организм. Л., ЛИОТ, 1958.
5. Борьба с шумом (ред. Е. Я. Юдин). М., Стройиздат, 1964.
6. К. Цвиккер, К. Костен. Звукопоглощающие материалы. М., ИЛ, 1952.

Ленинград

Поступила в редакцию
11 февраля 1966 г.