

УДК 681.84:677.5

Определение структурного фактора волокнистых металлических звукопоглощающих материалов

Н.А. Никифоров, А.И. Комкин

Исследованы особенности оценки акустических характеристик металлических звукопоглощающих материалов на примере материала МР. Основное внимание уделено определению структурного фактора такого материала по результатам экспериментальных исследований. Проведена аппроксимация полученных характеристик аналитическими выражениями.

Ключевые слова: пористый металлический материал, пористость, звукопоглощение, структурный фактор, измерение, аппроксимация.

The features to estimate the acoustic characteristics of metallic sound absorbing materials by the example of MP material are investigated. Great attention is paid to the definition of a structural factor of such material based on results of experimental researches. The approximation of the obtained characteristics by analytical expressions has been performed.

Keywords: porous metallic material, porosity, absorption, structure factor, measurement, approximation.

Снижение шума энергетических машин — одна из важнейших проблем защиты окружающей среды. Этой проблеме посвящены постановления международных комитетов, Государственных стандартов, она находится под постоянным контролем правительственных органов и общественности.

Проблема снижения шума решается с помощью применения эффективных глушителей. Создание таких глушителей требует, как правило, проведения большого объема расчетно-экспериментальных работ по определению рациональных путей снижения шума, разработки и внедрения новых высокоэффективных, универсальных звукопоглощающих материалов (ЗПМ), а также разработки методов расчета акустических характеристик этих материалов. Решение этой задачи позволит не только адекватно описать результаты экспериментальных исследований, но и даст возможность проектировать диссипативные глушители шума с заданной акустической эффективностью, удовлетворяя требования к гидравлическому сопротивлению, габаритным размерам и т. д.

В диссипативных глушителях шума, как правило, используют волокнистые ЗПМ, такие как базальтовое и стеклянное волокно. Однако



НИКИФОРОВ
Николай Анатольевич,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)



КОМКИН
Александр Иванович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Экология
и промышленная безопасность»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

эти материалы не конструктивны и требуют защитных оболочек от выдувания. Существенное повышение уровня требований к системам снижения шума выдвигает использование в первую очередь высокоэффективных пористых волокнистых материалов, среди которых наиболее перспективную группу ЗПМ представляют материалы на металлической основе и не только за их более высокие эксплуатационные характеристики, но и благодаря возможности достижения у таких материалах уникального сочетания целого комплекса акустических и физико-механических свойств, открывающих преимущественно новые возможности для их практического использования.

Среди различных типов пористых материалов хорошо зарекомендовали себя пористые порошковые, сетчатые, волокнистые, комбинированные пористые и высокопористые ячеистые материалы. Среди них наибольший интерес представляют волокнистые материалы с частично связанной структурой. К ним можно отнести металлический войлок, получаемый путем прессования довольно коротких проволок, материал на основе вязаных сеток, материал МР, изготовленный методом холодного прессования металлической спирали и др.

Один из основных параметров ЗПМ — пористость, характеризующая долю пустот в единице объема материала. Пористость бывает трех видов: открытая, закрытая и полузакрытая (полуоткрытая) или тупиковая. Общая пористость материала рассчитывается по следующей формуле:

$$\sigma_{\text{общ}} = \sigma_{\text{откр}} + \sigma_{\text{закр}} + \sigma_{\text{туп}}$$

Для определения пористости материалов волокнистого строения часто используют объемно-весовой метод, согласно которому

$$\sigma = 1 - G/(gV), \quad (1)$$

где G — масса образца; g — удельный вес исходного материала; V — объем образца.

Этот метод позволяет, задавшись требуемым значением пористости, изготовить необходимый образец с достаточно высокой точностью.

Основное внимание в данной работе уделено материалу МР. Этот наиболее перспективный пористый волокнистый ЗПМ имеет двухкомпонентную структуру: первый компонент — металлическая проволока одного диаметра, второй — воздушная среда. Материал МР имеет самую простую геометрию пористого пространства и представляет собой однородную пористую массу, полученную холодным прессованием растянутой и дозированной по массе проволоочной спирали. Материал МР обладает высокой активной пористостью (0,13...0,95), отсутствием тупиковых и закрытых пор. Он характеризуется большой удельной поверхностью и способен сохранять свои свойства в любых реальных климатических условиях в течение практически неограниченного времени. Сравнительно простая технология позволяет получать из этого материала изделия с хорошей стабильностью свойств. Пористый материал МР хорошо воспринимает как статические, так и динамические нагрузки. В зависимости от материала исходной проволоки он может работать в широком диапазоне температур и агрессивных средах. Изделия из этого материала можно получать с заранее заданными параметрами [1].

Учитывая, что материал МР изготавливается из одного компонента — металлической проволоки одного диаметра, его основные структурные характеристики можно выразить через два параметра — диаметр $d_{\text{пр}}$ и длину исходной проволоки. В этом случае величину пористости можно рассчитать по формуле

$$\sigma = 1 - V_{\text{пр}}/V_{\text{изд}},$$

где $V_{\text{пр}}$ — объем проволоки в образце; $V_{\text{изд}}$ — объем изделия.

Материал МР можно считать однородным, при его прессовании происходит перераспределение усилий, что устраняет неоднородности в нем. Закон распределения пор по объему материала МР — нормальный, в образовании порового пространства преобладают поры доста-

точно узкого диапазона размеров. Большая часть порового пространства образована порами одного размера, что свидетельствует о высокой степени его однородности. Однородность порового пространства способствует уменьшению резких динамических изменений в физических процессах поглощения звуковой энергии.

Средний диаметр пор d_{cp} — одна из основных характеристик порового пространства, которая в значительной мере определяет акустические свойства материала. Обычно сравнение пористых материалов проводят по величине среднего диаметра пор. Исследования образцов материала МР из проволоки разного диаметра позволили сделать вывод, что для этого материала средний диаметр равен гидравлическому диаметру d_r пор и определяется выражением

$$d_{cp} = d_r = \sigma d_{np} / (1 - \sigma). \quad (2)$$

Как следует из формулы (2) средний диаметр пор зависит от пористости и диаметра исходной проволоки (рис. 1).

Более подробно этот вопрос рассмотрен в работах [1–3]. Отмечено, что толщина образца практически не оказывает существенного значения на размер пор волокнистых материалов. Средний диаметр пор является наиболее приемлемым параметром для математического описания структурного фактора пористых волокнистых металлических ЗПМ.

Другим важным параметром ЗПМ является структурный фактор, который зависит от структуры пористого пространства — размеров и формы пор, таких как: расположение пор, извилистость, максимальный и минимальный диаметр, длина пор, удельная поверхность порового пространства.

В классическом представлении пористого материала в виде узких капиллярных трубок с одинаковым поперечным сечением, соответствующем модели Релея [2], величина структурного фактора будет пропорциональна выражению $1/\cos^2\theta$, где θ — угол наклона трубок к направлению распространения звуковой волны.

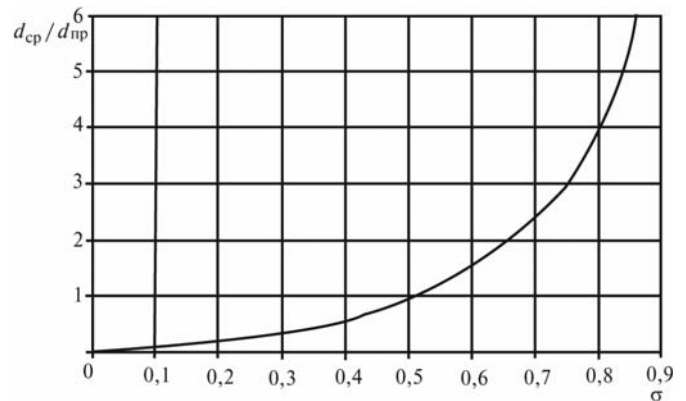


Рис. 1. Зависимость среднего диаметра пор и диаметра исходной проволоки от пористости материала

При любом законе изменения площади сечения поры по ее длине, значение структурного фактора будет больше или равно 1. Для идеальной среды с хаотически расположенными в материале волокнами значение структурного фактора равно 3, для большинства других реальных пористых материалов это значение может быть значительно выше.

Структурный фактор зависит также от относительной шероховатости поверхности пористого материала. За относительную шероховатость пористого материала принято считать отношение высоты неровностей на поверхности этого материала δ_v к среднему размеру пор d_{cp} в нем. Исследования показывают, что относительная шероховатость пор может достигать очень больших значений [3]. Увеличение относительной шероховатости поверхности пор приводит к усложнению структуры порового канала. Относительная шероховатость поверхности пор в материалах, изготовленных из проволоки, сеток и волокон из проволок невелика, так как поверхность исходного материала обычно имеет низкую шероховатость, и поэтому при расчетах не учитывается.

Для высокопористых материалов с низким удельным сопротивлением газовому потоку структурный фактор может быть определен из резонансных частот пористого слоя ω_p толщи-

ной l , расположенного на жестком основании, из соотношения [2]

$$\omega_p l \frac{\sqrt{\chi}}{c_0} = \frac{\pi}{2}; \pi, \quad (3)$$

где χ — структурный фактор.

Для ЗПМ с жестким скелетом структурный фактор иногда представляют в виде отношения объема воздуха, участвующего в сжатии под действием звуковой волны V_k , к объему воздуха, ускоряющегося под воздействием звуковой волны V_b [4]:

$$\chi = V_k / V_b.$$

Для определения структурного фактора одного класса звукопоглощающих материалов Л. Беранек предложил использовать линейное соотношение между пористостью и структурным фактором, при этом при значении пористости близкой к 1 структурный фактор также близок к 1, а при пористости 0,5 — $\chi = 3,5$.

На основе исследований физико-технических и акустических характеристик волокнистых пористых материалов, а также разработок на их основе элементов звукопоглощающих конструкций, проведенных в МГТУ им. Н.Э. Баумана [6–9], предпринята попытка математически описать структурный параметр пористых звукопоглощающих металлических волокнистых материалов, базируясь на знании геометрических параметрах исходных материалах.

Следует отметить, что теоретическим исследованиям ЗПМ, связанным с математическим моделированием структурных характеристик этих материалов, посвящено мало работ. При этом можно выделить три подхода, используемые при математическом моделировании ЗПМ. Первый подход — микроструктурный, основанный на рассмотрении структуры ЗПМ. Второй подход — феноменологический, при котором математическая модель строится исходя из ряда предположений о механизме затухания звука в ЗПМ, и третий подход, при котором не проводится математического моделиро-

вания как такового, а формулы, описывающие звукопоглощение в материале, являются результатом аппроксимирования экспериментальных результатов.

Проектирование и расчет систем снижения шума с применением ЗПМ требует знания акустических характеристик используемых материалов. Теоретически эти характеристики могут быть получены из уравнений, определяющих распространение звуковых волн вдоль оси X в пористом материале [2]:

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\chi}{\sigma} \rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} + rv; \quad (4)$$

$$-\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\sigma}{K_0 \gamma} \frac{\partial p}{\partial t}, \quad (5)$$

где p и v — давление и скорость частиц в звуковой волне соответственно; ρ_0 и K_0 — плотность и объемный модуль упругости воздушной среды соответственно; γ — отношение теплоемкостей при постоянном давлении и объеме. В эти уравнения входят также параметры, характеризующие сам пористый материал: пористость материала σ , удельное сопротивление материала движению газового потока r и структурный фактор χ . При этом, если первые два параметра можно рассчитать или определить существующими экспериментальными методами, то определить прямыми расчетными или экспериментальными методами значение структурного фактора практически невозможно, ввиду сложности порового пространства.

В связи с этим авторами предпринята попытка получить аналитическое выражение для определения структурного фактора пористых волокнистых ЗПМ в зависимости от среднего диаметра исходного материала и пористости.

Пренебрегая тепловыми потерями, И. Крэндаллом было получено выражение для эффективной плотности воздушной среды в цилиндрических каналах модели Релея, согласно которой реальный пористый материал рассматривается как совокупность сквозных цилиндрических каналов одинакового радиуса (R), расположенных параллельно вдоль оси

в направлении распространения звуковой волны. Однако, для расчета реальных пористых сред эти выражения не пригодны. В реальных случаях для материалов с незначительными колебаниями радиуса пор по длине материала К. Цвиккером и К. Костеном рекомендовано скорректировать выражение, полученное И. Крэндаллом для эффективной плотности воздушной среды, умножив его на выражение χ/σ . При этом формула для определения комплексной плотности в порах материала будет иметь следующий вид:

$$\rho = \rho_x + j\rho_y = \frac{\chi}{\sigma} \rho_0 \left[1 - \frac{2}{\mu\sqrt{-j}} \frac{J_1(\mu\sqrt{-j})}{J_0(\mu\sqrt{-j})} \right]^{-1}, \quad (6)$$

где J_0 и J_1 — функция Бесселя нулевого и первого порядка; μ — отношение инерционных сил к силе трения воздушной среды в материале, $\mu = R\sqrt{\omega\rho_0/\eta}$; η — динамическая вязкость воздуха.

Из формулы [6] следует выражение для структурного фактора

$$\chi = \sigma\rho_x / \rho_0. \quad (7)$$

Наряду с этим, из решения системы уравнений (4), (5) можно получить [4] следующее выражение для структурного фактора:

$$\chi = \sigma^2 \operatorname{Re} \left(\frac{W}{W_0} \right)^2, \quad (8)$$

где W — волновое сопротивление материала; W_0 — волновое сопротивление воздуха.

Кажется парадоксальным, что структурный фактор — параметр, характеризующий структуру материала, выражается через физические параметры среды. Однако, это можно объяснить, если рассмотреть физические процессы механизма поглощения звуковых волн в пористой среде. Поскольку любая модель лишь только приблизительно описывает реальную сущность структуры материала и не дает полной связи механизма поглощения с акустическими характеристиками материала, описание ее вполне допустимо с использованием всех трех

подходов, степень надежности которых зависит от многих факторов и в первую очередь от степени соответствия реальной структуры выбранной модели, что требует изучения физико-технических характеристик ЗПМ и механизма поглощения звука в нем.

Поглощение звуковой энергии в пористой среде происходит различными физическими механизмами [5]. Под действием переменного давления звуковой волны воздушная среда осуществляет возвратно-поступательное движение в порах материала. При обтекании волокон в пористом материале создаются вязкие диссипативные силы (внешние), пропорциональные объемной скорости, при этом возникает сила трения, вызывающая потери звуковой энергии. Это происходит в случае, когда величина пограничного слоя в поровом канале больше радиуса поры. Одним из механизмов звукопоглощения являются вязкие потери, вызванные скольжением отдельных слоев среды друг по другу (внутреннее) трение и пропорциональные скорости сдвиговой деформации среды. Механика этих сложных процессов в газах заключается в диффузии молекул газа из одного участка в другой, сопровождающаяся обменом количества движения, что приводит к выравниванию средних скоростей движения.

В звуковой волне среда испытывает сжатие и разряжение, при этом температура среды в местах сжатия повышается, а в местах разряжения понижается, что приводит к термическому механизму поглощения звуковой энергии. Этот механизм реализуется двумя путями — теплопроводностью и теплоизлучением. Оба эти процесса выравнивают температурные различия между смежными участками среды и средой в целом. В пористом волокнистом материале это происходит вследствие его контакта с большой поверхностью пор. При этом наблюдается интенсивный теплообмен между средой и волокнами.

В процессе перехода из одной формы состояния в другую происходит теплообмен среды с волокнами и как следствие наблюдаются тепловые потери. Для большого числа материалов наличие в структуре узких пор, изломов, резкого изменения сечения поровых каналов,

поворотов и других явлений приводит к изменению характера механизма поглощения и специфическим потерям. Динамика поглощения звуковой энергии в пористых материалах с жестким скелетом определяется в основном размерами ее пор минимального сечения.

Сопротивление пористых ЗПМ воздушному потоку в области низких частот близко по характеру к сопротивлению материала для стационарного потока с параболическим распределением скорости по сечению канала. В случае колебаний высоких частот характер потока существенно изменяется. При этом влияние твердых стенок испытывают только наружный слой воздуха, а в центральной области пор воздух колеблется как единое целое и скорость определяется его массой. На частотах, при которых стенки перестают оказывать влияние на движение газового потока, прекращается теплообмен между стенками и центральной частью потока.

Необходимо отметить, что структурный фактор пористых ЗПМ зависит от частоты звуковых колебаний. Так, например, у звукопоглотителей из материала «Силан» структурный фактор в диапазоне частот 200...4 000 Гц уменьшается от 6 до 1,4 [4], как отмечено некоторыми авторами, подобная зависимость наблюдается и у ряда других пористых ЗПМ.

Экспериментальное определение структурного фактора заключается в первоначальном измерении волновых параметров ЗПМ и последующем его расчете [6, 7]. До недавнего времени эти параметры (W — волновое сопротивление и k — постоянная распространения) определялись методом стоячей волны в измерительной трубе. Несмотря на то, что этот метод известен давно, он и по сей день остается наиболее часто используемым. Однако, несмотря на простоту данный метод стоячей волны трудоемок, это обусловлено необходимостью поиска минимума стоячей волны на определенных частотах исследуемого диапазона. Кроме того, точность метода зависит от точности определения этого минимума, а так-

же от динамического диапазона амплитуд звукового давления, а размещение микрофонного зонда в измерительной трубе нарушает однородность звукового поля. Обычно волновые параметры ЗПМ определяют методом двух полостей, при котором сначала проводят измерения и определяют импеданс исследуемого образца, установленного на жесткой стенке Z_d , а затем входной импеданс этого же образца, установленного на расстоянии четверти длины волны от жесткой стенки $Z_{\lambda/4}$ (рис. 2):

$$Z_d = W \operatorname{cth}(kd); \tag{9}$$

$$Z_{\lambda/4} = W \operatorname{th}(kd). \tag{10}$$

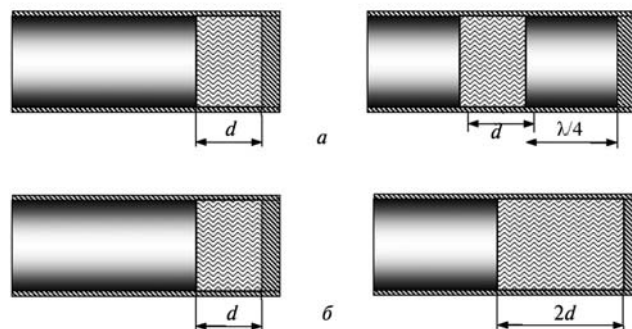


Рис. 2. Расположение ЗПМ при измерениях методом двух полостей (а) и методом двух толщин (б)

Далее вычисляют значения W и k :

$$W = \sqrt{Z_d Z_{\lambda/4}}, \tag{11}$$

$$k = \frac{1}{d} \operatorname{arth} \sqrt{\frac{Z_{\lambda/4}}{Z_d}}. \tag{12}$$

Используют также метод «двух толщин», при котором проводят измерения и определяют нормальные импедансы Z_d и Z_{2d} для образцов ЗПМ толщиной d и $2d$ соответственно, устанавливаемых вплотную к жесткой стенке. При этом акустические характеристики ЗПМ определяются следующими выражениями:

$$W = \frac{Z_d}{\operatorname{cth}(kd)}; \tag{13}$$

$$k = \frac{1}{2d} \operatorname{arch} \left(\frac{Z_d}{Z_{2d}} - 1 \right)^{-1}. \quad (14)$$

Определив величины W и k , можно найти эффективную плотность ЗПМ:

$$\rho = \rho_x + j\rho_y = \frac{Wk}{j\omega}. \quad (15)$$

Тогда значения структурного фактора можно вычислить по формулам (7) или (8).

Зависимости структурного фактора от частоты звуковых колебаний для материала МР, полученные по результатам экспериментальных исследований [5], представлены на рис. 3. На рисунке видно, что в области низких частот значение структурного фактора больше, чем на высоких частотах. С увеличением частоты значение структурного фактора падает и становится практически постоянным в области высоких частот. Это происходит вследствие параболического распределения скорости движения воздушной среды в области низких частот по поперечному сечению пор, при этом действительная часть эффективной плотности среды

возрастает с уменьшением частоты звуковых колебаний по отношению к нормальной плотности свободного пространства, что соответствует ламинарному течению среды. Характер поведения структурного фактора для материала МР в области низких частот соответствует адиабатическим процессам поглощения звуковой энергии в пористом ЗПМ в этой области частот, это особенно заметно для материала с относительно небольшой пористостью (0,6...0,7). В области высоких частот физика процесса распространения звуковых колебаний существенно меняется. При этом ламинарный характер течения переходит в турбулентный, влияние твердых стенок пор ослабевает, что приводит к исчезновению параболического распределения скорости течения по порам, уменьшению эффективной плотности воздуха и соответственно увеличению структурного фактора материала.

Представленные на рис. 3 и 4 результаты показывают, что величина структурного фактора существенно зависит от пористости материала и диаметра исходной проволоки, причем эта зависимость носит нелинейный характер. Уменьшение пористости и диаметра исходной

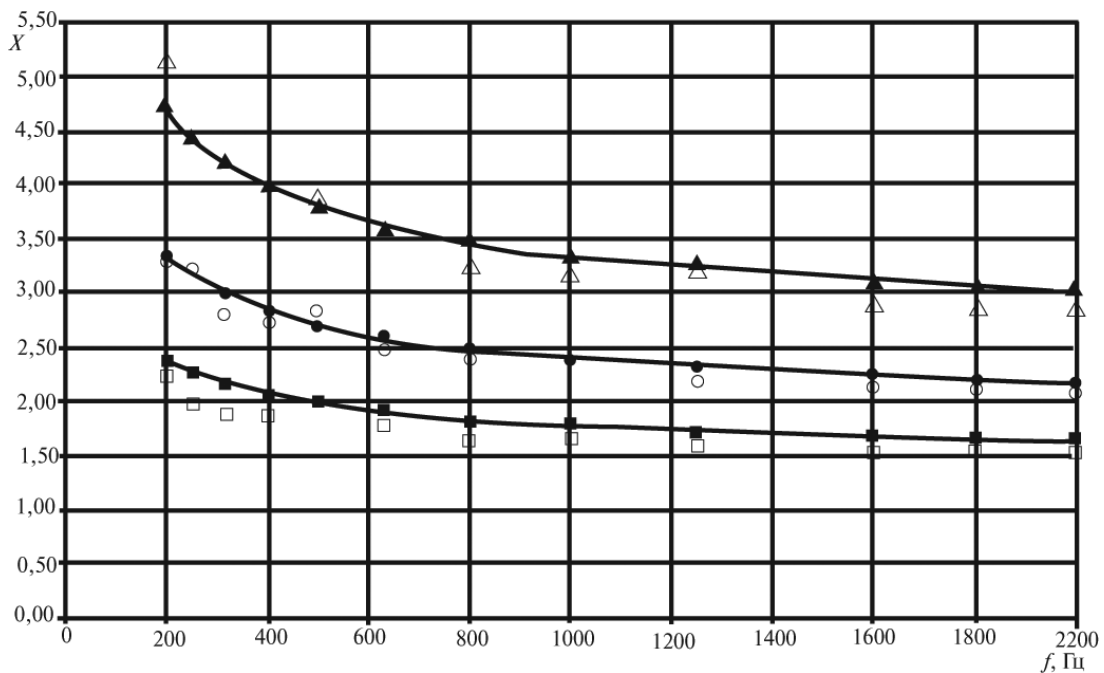


Рис. 3. Зависимость структурного фактора от частоты при одинаковом диаметре исходной проволоки ($d_{np} = 0,2$ мм) и разных значениях пористости:

—●— $\sigma = 0,8$ (расч.); —■— $\sigma = 0,7$ (расч.); —▲— $\sigma = 0,6$ (расч.);
 —○— $\sigma = 0,8$ (эксп.); —□— $\sigma = 0,7$ (эксп.); —△— $\sigma = 0,6$ (эксп.)

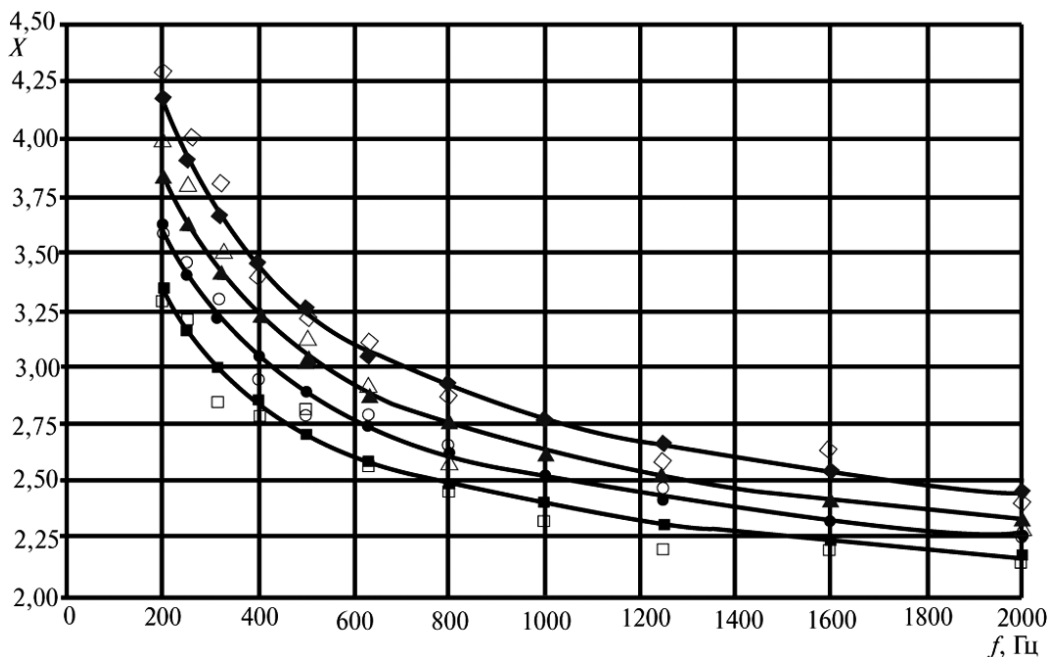


Рис. 4. Зависимость структурного фактора от частоты при одинаковой пористости материала ($\sigma = 0,7$) и разных диаметрах исходной проволоки ($d_{пр}$):

—■— $d_{пр} = 0,2$ мм (расч.); —●— $d_{пр} = 0,15$ мм (расч.); —▲— $d_{пр} = 0,12$ мм (расч.); —◆— $d_{пр} = 0,09$ мм (расч.);
 —□— $d_{пр} = 0,2$ мм (эксп.); —○— $d_{пр} = 0,15$ мм (эксп.); —△— $d_{пр} = 0,12$ мм (эксп.); —◇— $d_{пр} = 0,09$ мм (эксп.)

проволоки приводит к увеличению структурного фактора. Это также следует из теоретического рассмотрения механизма поглощения звуковой энергии и подтверждается экспериментально. Так например, на рис. 3 видно, что при одинаковом диаметре исходной проволоки ($d_{пр} = 0,2$ мм) на частоте 2 000 Гц структурный фактор материала для пористости $\sigma = 0,8$ составляет 1,5, для $\sigma = 0,7$ — 2,1, а для $\sigma = 0,6$ структурный фактор равен 3,0.

В общем случае структурный фактор материала МР может быть выражен функцией

$$\chi = \varphi(\sigma, d_{ср}, \omega). \tag{16}$$

Изучение параметров структуры пористых волокнистых ЗПМ и анализ экспериментальных результатов позволяет предложить довольно простое аппроксимирующее выражение для структурного фактора звукопоглощающего материала МР:

$$\chi = \frac{A}{\sigma^2} + \frac{B}{\sigma \sqrt{k d_{ср}}}, \tag{17}$$

где A и B — постоянные коэффициенты; $k = \omega/c$ — волновое число.

Первое слагаемое в этом выражении характеризует зависимость структурного фактора от пористости, а второе слагаемое описывает влияние среднего диаметра пор $d_{ср}$, а значит и диаметра проволоки $d_{пр}$, а также частоты звуковых волн на величину структурного фактора материала.

Графические зависимости, характеризующие структурный фактор материала МР и вычисленные по формуле (17) при значениях постоянных $A = 0,8$ и $B = 5 \cdot 10^{-2}$, представлены на рис. 3 и 4 сплошной линией. Эти данные хорошо, в пределах 15%, аппроксимируют значения структурного фактора, полученные экспериментальным путем описанными выше методами первого резонанса и двух полостей. Кроме того, полученные зависимости структурного фактора от параметров материала, хорошо совпадают с характером поведения структурного фактора, отмеченных другими авторами.

Расчет структурного фактора по формуле (17) позволяет по заданным значениям пористости материала диаметра исходной проволоки с определенной точностью получать величину заданного структурного фактора для дальней-

шего определения необходимых акустических параметров.

Полученное выражение для определения структурного фактора пригодно для расчета акустических параметров других пористых ЗПМ этой группы, например, для расчетов структурного фактора звукопоглощающих волокнистых пористых металлических материалов, изготовленных из вязаных сеток, пористых спеченных материалов из металлических сеток и др.

Таким образом, результаты данной работы позволяют на стадии проектирования звукопоглощающих систем с применением пористо-волокнистых материалов определять параметры необходимого материала, обеспечивающего требуемые акустические характеристики конструкции.

Литература

1. *Изжеуров Е.А.* Формирование элементов конструкций газодинамического тракта энергетических установок из упругого материала МР. М.; 2001. 285 с.
2. *Цвиккер К., Костен К.* Звукопоглощающие материалы: Пер с англ. М.: ИЛ, 1952. 160 с.
3. *Белов С.В.* Пористые металлы в машиностроении. М.: Машиностроение, 1981. 248 с.
4. Справочник по технической акустики: Пер. с нем./ Под ред. М. Хекла и Х.А. Мюллера. Л.: Судостроение, 1980. 440 с.
5. *Исакович М.А.* Общая акустика. М.: Наука, 1973. 495 с.
6. *Поляев В.М., Никифоров Н.А., Белоусов А.И.* Акустические параметры пористого материала МР // Известия вузов. Машиностроение. 1977. № 12. С. 111—113.
7. *Поляев В.М., Никифоров Н.А.* и др. Применение пористого материала МР в звукопоглощающих конструкциях // Известия вузов. Машиностроение. 1977. № 11. С. 120—124.
8. Материалы и покрытия в экстремальных условиях. Взгляд в будущее: В 3 т. Т. 2. Передовые технологии производства / В.В. Скороход, Н.А. Никифоров, С.В. Резник и др.; Под ред. С.В. Резника. М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2002. 293 с.
9. *Комкин А.И., Никифоров Н.А.* Акустические характеристики пористо-волокнистых металлических материалов // Безопасность жизнедеятельности. 2004. № 6. С. 10—12.
10. *Комкин А.И., Никифоров Н.А.* Современные методы измерения акустических характеристик однородных звукопоглощающих материалов // Безопасность жизнедеятельности. 2006. № 8. С. 22—26.

Статья поступила 09.06.2011 г.