

Измерение сопротивления продуванию волокнистых звукопоглощающих материалов

А. И. КОМКИН, В. А. ЛЬВОВ, Н. С. НЕСТЕРОВ

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,
Москва, Россия, e-mail: akomkin@mail.ru

Измерено сопротивление продуванию потоком воздуха волокнистых звукопоглощающих материалов трёх видов с волокнами различных диаметров. Экспериментально определены зависимости сопротивления продуванию исследуемых материалов от их плотности. Для аналитической аппроксимации полученных зависимостей предложено использовать безразмерные комплексы.

Ключевые слова: звукопоглощающий материал, волокно, плотность, сопротивление продуванию потоком воздуха.

The resistance to blowout of the three types of fibrous sound-absorbing materials with different diameters of the fibers were measured. According to the results of experimental studies the dependence of the resistance to blowout of the investigated materials from their density was determined. It was proposed to use dimensionless parameters for analytical approximation of the obtained dependences.

Key words: sound absorbing material, fiber, density, resistance to blowout.

Знание акустических характеристик звукопоглощающих материалов (ЗПМ) имеет большое значение в прикладной акустике, в частности при проектировании диссипативных глушителей шума. Такие характеристики могут быть найдены экспериментально по результатам соответствующих акустических измерений в специальной измерительной трубе [1]. Также акустические характеристики ЗПМ можно определить по их сопротивлению продуванию потоком воздуха [2]. Данный подход широко применяется, так как позволяет непосредственно представлять акустические характеристики ЗПМ в аналитическом виде. Кроме того, сопротивление продуванию потоком воздуха используется в качестве исходного параметра при теоретическом описании ЗПМ [3]. Большой практический интерес представляет установление связи между сопротивлением продуванию материала и его структурными параметрами – плотностью и диаметром волокон. Для этого разработаны математические модели волокнистых ЗПМ с регулярно расположенными в пространстве волокнами и в предположении случайного распределения волокон в объёме ЗПМ [4, 5]. Заметим, что на сопротивление продуванию материала оказывает влияние множество факторов, точное описание которых не всегда возможно. К ним можно отнести, например, шероховатость поверхности волокон. По этой причине большое внимание уделяется экспериментальным методам оценки сопротивления продуванию материалов [6], поскольку только результаты измерений могут подтвердить правомерность использования тех или иных математических моделей. При этом получаемые эмпирические зависимости сопротивления продуванию материала от его параметров аппроксимируются простыми аналитическими формулами. Например, сопротивление продуванию полагают пропорциональным плотности волокнистого материала. Однако оказывается, что нет однозначной связи между получаемыми коэффициентами аппроксимации и параметрами исследуемого ЗПМ [7].

Целью данной работы является устранение такой неоднозначности с применением модифицированного способа обработки данных измерений.

Проведение измерений. Удельное сопротивление продуванию r материала выражается как

$$r = \Delta p / (vI) = S \Delta p / (QI), \quad (1)$$

где Δp — перепад давлений на образце материала толщиной I и площадью поперечного сечения S при продувании материала постоянным воздушным потоком со скоростью v и объёмным расходом $Q = vS$.

Существуют прямые и косвенные методы измерения сопротивления продуванию материалов. Авторы настоящей статьи применяли прямой метод измерений, заключающийся в пропускании регулируемого однонаправленного постоянного потока воздуха через образец цилиндрической формы и измерении перепада давления между двумя свободными лицевыми поверхностями образца. Этот метод позволяет напрямую вычислять сопротивление продуванию с помощью базовой формулы (1). Основные требования, предъявляемые к реализации прямого метода измерений, приведены в стандарте [8].

Исследовали сопротивление продуванию трёх волокнистых ЗПМ на основе: стекловолокна (средний диаметр волокон $d_b = 10$ мкм) — I; базальтового волокна ($d_b = 12$ мкм) — II; базальтового волокна ($d_b = 27$ мкм) — III.

Исследуемый материал помещали в специальную секцию измерительной камеры. Длина этой секции $l = 50$ мм, её внутренний диаметр, как и диаметр всей измерительной камеры $D = 64$ мм. Таким образом, объём секции был фиксированным, поэтому объёмную плотность ρ_m исследуемого образца ЗПМ регулировали соответствующим выбором его массы. Для измерения перепада давления использовали трубки Пито, расположенные на обеих сторонах образца,

которые присоединяли к дифференциальному манометру. Скорость потока измеряли интегрирующим расходомером. Подробно схема измерительной установки рассмотрена в [9]. Исследовали сопротивление продуванию образцов ЗПМ плотностью 75, 100, 125, 150 и 175 кг/м³. Измерения проводили при пяти скоростях воздушного потока, изменяющихся в диапазоне 0,004–0,020 м/с. В результате для каждого образца ЗПМ были измерены перепады давления Δp при выбранных скоростях воздушного потока.

Обработка результатов измерений. По данным измерений были построены графические зависимости градиента давления $\Delta p/\Delta x$ от скорости воздушного потока для образца плотностью 125 кг/м³ (рис. 1). Точками отмечены результаты измерений и показаны соответствующие 5 % интервалы средних квадратических отклонений (СКО), прямыми – аппроксимации этих данных линейными зависимостями, проходящими через начало координат. Тангенс угла наклона этих прямых согласно (1) будет определять искомые значения сопротивления продуванию исследуемых. Аналогичные зависимости были получены для образцов ЗПМ других плотностей.

Данные рис. 1 позволяют построить графические зависимости сопротивления продуванию исследуемых материалов от их плотности (рис. 2). Далее экспериментальные зависимости аппроксимировали аналитической функцией, в качестве которой использовали степенную функцию вида

$$r = A\rho_m^B, \quad (2)$$

где A, B — некоторые постоянные; A зависит от диаметра волокна ЗПМ; $B = 1,53$ [9, 10].

При проведении аппроксимации к пяти экспериментальным точкам добавляли исходя из физических соображений шестую точку с координатами (0, 0). Полученные таким образом аппроксимирующие кривые представлены на рис. 2 сплошными линиями и расположены друг под другом. Там же показаны соответствующие 5 % интервалы СКО. Наблюдается обратная зависимость сопротивления продуванию от диаметра волокна материала, независимо от плотности материала. Коэффициенты аппроксимации разных ЗПМ заметно различаются. Коэффициент пропорциональности A существенно изменяется, показатель степени B изменяется значительно меньше. При этом не прослеживается какой-либо связи в изменениях значений этих коэффициентов при изменении, например, диаметра волокна ЗПМ. Отсюда следует, что такой подход при аппроксимации результатов измерений не позволяет адекватно описывать полученные экспериментальные данные. В связи с этим возникает необходимость использования альтернативных способов обработки результатов измерений при определении сопротивления продуванию волокнистых ЗПМ.

Безразмерные комплексы. Для описания течения воздуха в пористой среде обычно используют два безразмерных комплекса, в качестве которых выступают числа Эйлера Eu и Рейнольдса Re :

$$Eu = \Delta p / (\rho v^2); \quad Re = \nu \rho d / \mu, \quad (3)$$

где d — характерный размер пористой структуры образца ЗПМ; $\rho = 1,2$ кг/м³ — плотность воздуха; $\mu = 1,81 \cdot 10^{-5}$ Па·с — коэффициент динамической вязкости воздуха.

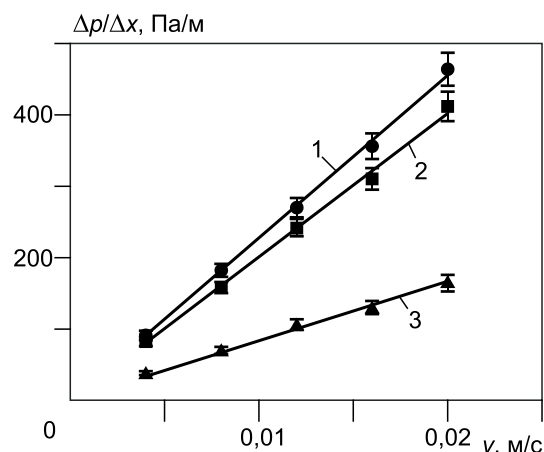


Рис. 1. Зависимости градиента давления от скорости воздушного потока для материалов I (1), II (2) и III (3) (точки) плотностью $\rho_m = 125$ кг/м³ и их линейные аппроксимации с коэффициентами пропорциональности 22777 (1); 20100 (2); 8345,5 (3)

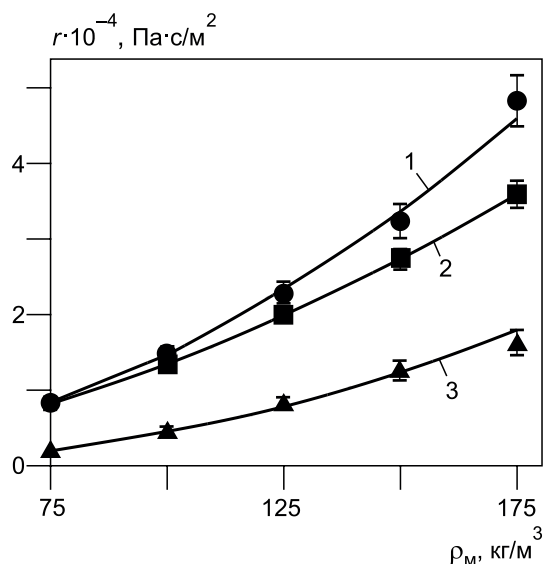


Рис. 2. Зависимости сопротивления продуванию материалов I (1), II (2), III (3) (точки) от их плотности и их аппроксимации (кривые) $r_I = 1,39\rho_m^{2,02}$ (1); $r_{II} = 3,97\rho_m^{1,76}$ (2); $r_{III} = 0,04\rho_m^{2,51}$ (3)

Однако, чтобы непосредственно связать безразмерные комплексы с сопротивлением продуванию, необходимо в качестве безразмерного комплекса взять не число Эйлера Eu , а связанный с ним коэффициент сопротивления трению [11]:

$$\xi = Eu d / l = \Delta p d / (\rho V^2 l) \quad (4)$$

При этом за характерный размер пористой структуры, входящий в безразмерные комплексы Re (3) и ξ (4), при обработке результатов эксперимента целесообразно принять диаметр волокна d_v .

Идея применения безразмерных комплексов ξ и Re для обработки экспериментальных данных основана на том, что при ламинарном режиме течения существует обратно пропорциональная зависимость

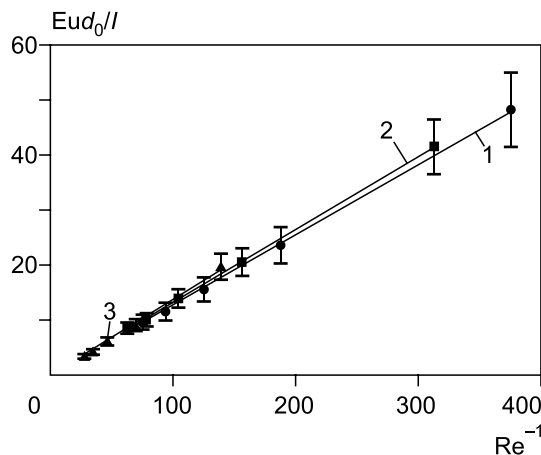


Рис. 3. Зависимости между безразмерными комплексами для материалов I (1), II (2), III (3) (точки) с плотностью $\rho_m = 125 \text{ кг/м}^3$ и их линейные аппроксимации с коэффициентами пропорциональности 0,132 (1); 0,127 (2); 0,138 (3)

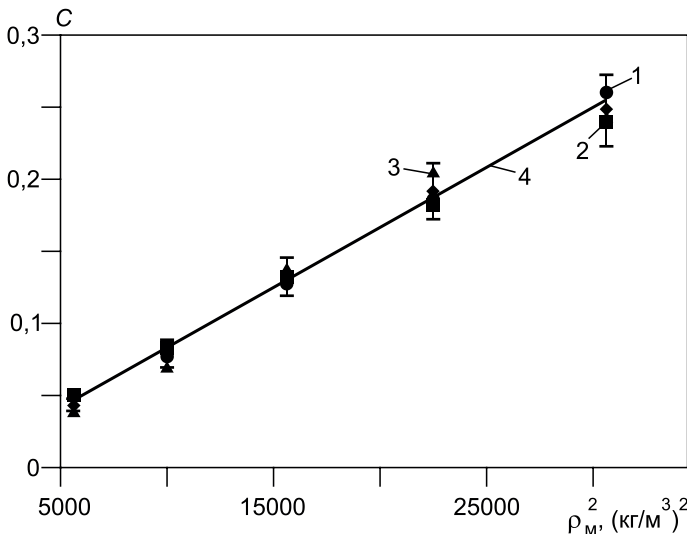


Рис. 4. Зависимости коэффициента C от квадрата плотности материалов I (1), II (2), III (3), среднего значения коэффициента C (4) (точки) и линейная аппроксимация

$$\xi = C/Re, \quad (5)$$

где C – коэффициент, определяемый на основе экспериментальных исследований, предположительно для исследуемых волокнистых ЗПМ $C = \text{const}$.

Таким образом, если представленные на рис.1 графики перестроить в координатах ξ и Re , то для всех исследуемых материалов они совпадут. В действительности для каждого ЗПМ различной плотности указанные графики не совпадают. И, следовательно, для каждого рассмотренного материала будет свой коэффициент C .

Структурный фактор. Избежать такого разброса значений коэффициента C можно введением характеризующего волокнистый ЗПМ дополнительного параметра, который не входит в описанные выше безразмерные комплексы, например, структурного фактора χ [7, 12]. Эта величина связана с извилистостью структуры волокнистого материала, может рассматриваться как показатель увеличения эффективной длины исследуемого образца материала и поэтому должна

быть больше единицы. При этом выражение (4) для коэффициента сопротивления трения преобразуется к виду

$$\xi = Eud_b / (l\chi). \quad (6)$$

По экспериментальным данным установлено, что коэффициент C из (5) в первом приближении остаётся постоянным для всех изучаемых ЗПМ, если структурный фактор пропорционален диаметру волокна d_b . В силу того, что структурный фактор – безразмерная величина, будет справедливым равенство $\chi = d_b/d_0$, где d_0 – некоторое пороговое значение диаметра волокна. Если принять d_0 равным наименьшему из диаметров волокон исследуемых материалов, то для ЗПМ I с волокнами диаметром $d_b = d_0$ получим структурный фактор $\chi = 1$, а для ЗПМ II, III его значения составят 1,2; 2,7. В этом случае выражение (6) для коэффициента сопротивления трения примет вид

$$\xi = Eud_0 / l. \quad (7)$$

Зависимость сопротивления продуванию от плотности материала. Далее были построены графические зависимости $\xi(Re^{-1})$ для каждого ЗПМ. В качестве примера на рис. 3 приведены указанные зависимости для материала плотностью $\rho_m = 125 \text{ кг/м}^3$. Как и ожидалось, эти зависимости оказались близки к линейным. Наклоны аппроксимирующих прямых на графиках, определяющие соответствующие значения постоянной C из (5), немного отличаются, т. е. существует некоторый разброс значений C . Поэтому для ЗПМ разной плотности эти значения усредняли. В результате для пяти значений плотности были получены следующие средние значения коэффициента C :

$\rho_m, \text{ кг/м}^3$	75	100	125	150	175
Коэффициент C	0,043	0,077	0,132	0,191	0,248

Значения коэффициента C существенно изменяются с изменением плотности материала ρ_m . Предположим, что эти изменения описываются квадратичной зависимостью, тогда зависимость коэффициента C от квадрата плотности материала должна быть линейной, что подтверждается рис. 4 (СКО не более 10 %). В итоге указанная зависимость примет вид

$$C(\rho_m) = 1,2 \cdot 10^{-5} \rho_m^2 / \rho^2. \quad (8)$$

После подстановки (8) в (5) и с учётом (1), (3), (7) получим формулу для сопротивления продуванию ЗПМ

$$r = 1,2 \cdot 10^{-5} \mu \rho_m^2 / (d_0 d_b \rho^2) = 2,17 \cdot 10^{-10} \rho_m^2 / (d_0 d_b \rho^2). \quad (9)$$

Таким образом, использование безразмерных комплексов позволяет описать сопротивление продуванию формулой (9), аналогичной (2). Это позволяет уточнить значения входящих в (2) постоянных: коэффициент $B = 2$, коэффициент A согласно (9) имеет прямую зависимость от диаметра волокна ЗПМ. В результате со-

противление продуванию волокнистых ЗПМ I, II, III выражается как

$$r_I = 1,51\rho_m^2; \quad r_{II} = 1,26\rho_m^2; \quad r_{III} = 0,56\rho_m^2. \quad (10)$$

Заметим, что при аппроксимации полученных ранее (см. рис. 2) экспериментальных данных с использованием формулы (2), в которой $B = 2$, коэффициент A практически совпадает с расчётными значениями (10), полученными по (9). При этом аппроксимация обеспечивает СКО не более 7 %.

Выводы. Прямым методом измерено сопротивление продуванию волокнистого ЗПМ. Полученная зависимость сопротивления продуванию от плотности материала с высокой точностью аппроксимируется аналитически степенной функцией. Использование для обработки экспериментальных данных безразмерных комплексов и структурного фактора позволило установить значение показателя степенной функции равное двум. Также установлены прямая пропорциональность структурного фактора и обратная пропорциональность сопротивления продуванию с диаметром волокна.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (Проект № 14-08-00703).

Л и т е р а т у р а

1. **Комкин А. И.** Методы измерения акустических характеристик звукопоглощающих материалов // Измерительная техника. 2003. № 3. С. 47–50.
2. **Delany M. E., Bazley E. N.** Acoustical properties of fibrous absorbent materials // Appl. Acoustics. 1970. V.3. No. 1. P. 105–115.

3. **Allard J. F., Atalla N.** Propagation of Sound in Porous Media. N.Y.: John Wiley & Sons, 2009.

4. **Комкин А. И., Никифоров Н. А.** Акустические характеристики пористо-волокнистых металлических материалов // Безопасность жизнедеятельности. 2004. № 6. С. 10–12.

5. **Tarnow V.** Airflow resistivity of models of fibrous acoustic materials // J. Acoustic. Soc. Amer. 1996. V. 100. No. 6. P. 3706–3713.

6. **Joshi M. P., Shravage P., Jain S. K., Karanth N. V.** A comparative study on flow resistivity for different polyurethane foam samples // J. Acoustic. Soc. India. 2011. V. 38. No. 4. P. 153–157.

7. **Михель Ф. П.** Звукопоглощающие материалы и их назначение: В кн. Снижение шума в зданиях и жилых районах / Под ред. Г. Л. Осипова и Е. Я. Юдина. М.: Стройиздат, 1987.

8. **ГОСТ Р EN 29053-2011.** Материалы акустические. Методы определения сопротивления продуванию потоком воздуха.

9. **Комкин А. И., Воробьева Л. С., Львов В. А., Теленков А. И.** Сопротивление продуванию волокнистых звукопоглощающих материалов // Безопасность жизнедеятельности. 2015. № 5. С. 45–48.

10. **Kino N.** A comparison of two acoustical methods for estimating parameters of glass fiber and melamine foam materials // Appl. Acoustics. 2012. V. 73. No. 3. P. 590–603.

11. **Жижкин А. М.** Гидравлические потери в элементах из материала МР // Вестник СГАУ. 2006. № 2. С. 173–176.

12. **Цвиккер К., Костен К.** Звукопоглощающие материалы. М.: ИЛ, 1952.

Дата принятия: 03.10.2016.