

А.В. Рогудеева, Д.М. Мордасов

ПНЕВМОДИНАМИЧЕСКИЙ ЧАСТОТНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ПОРИСТОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Изучение и разработка методов контроля пористости представляет собой актуальную задачу в условия развития твердофазных технологий, в частности получения новых материалов. Теоретическое и экспериментальное исследование процессов, протекающих в пористых средах, является существенным для применения пористых материалов в различных отраслях науки и техники, поэтому важным аспектом в развитии современных технологий является разработка неразрушающих и простых по конструктивной реализации методов и средств измерения пористости различных материалов.

Известны методики измерения пористости, основанные на заполнении порового пространства жидкостями с высокой проникающей способностью. Такие методы не лишены ряда недостатков, вызванных необходимостью тщательного подбора иммерсионной жидкости, невысокой разрешающей способностью и сложной аппаратной реализацией. Указанных недостатков лишены пневмопульсационные методы [1], согласно которым в измерительной емкости формируются импульсные изменения давления и о свойствах материала судят по изменению параметров, соответствующих резонансу давлений в образованной измерительной системе.

На рисунке 1 представлена физическая модель пневмопульсационной измерительной системы, включающей в себя емкость I переменного объема, пневматическое сопротивление 2 , представляющее собой аналог сопротивления пор измеряемого вещества, и емкость 3 , характеризующую объем открытых пор.

Состояние газа в емкости I описывается согласно закону Клапейрона–Менделеева уравнением

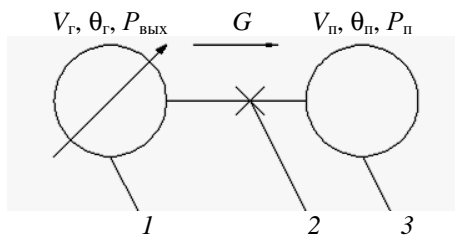


Рис. 1. Физическая модель пневмопульсационной измерительной системы

$$P_{\text{ВЫХ}} V_{\Gamma} = \theta_{\Gamma} R T, \quad (1)$$

где V_{Γ} , θ_{Γ} , $P_{\text{ВЫХ}}$ – объем, масса и давление газа в емкости I ; R – газовая постоянная; T – температура газа. Объем емкости I подвергают изменению по закону

$$V_{\Gamma}(t) = V_0 + \Delta V \sin \omega t, \quad (2)$$

где V_0 – начальный объем емкости I ; ΔV – амплитуда изменений объема емкости I ; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота; f – частота; t – время. При изменении объема V_{Γ} начинается процесс заполнения открытых пор измеряемого вещества. Через дроссель 2 инициируется расход газа G , величина которого определяется в виде

$$G = \alpha_{\text{П}} (P_{\text{ВЫХ}} - P_{\text{П}}), \quad (3)$$

где $\alpha_{\text{П}}$ – суммарная проводимость пор вещества; $P_{\text{П}}$ – давление газа в емкости 3 . С другой стороны, расход G представляет собой скорость изменения масс газа в емкостях $1, 3$. При заполнении емкости 3 состояние газа в ней изменяется по закону Клапейрона–Менделеева.

С учетом протекания данных процессов в емкости получим математическое описание взаимодействия газа с пористым материалом в пневмопульсационной измерительной системе, представленное в виде системы уравнений.

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{\text{ВЫХ}}(t) = \frac{e^{-At}}{\sqrt{A^2 - B}} \text{sh}(\sqrt{A^2 - B}t); \\ A = \frac{\delta V \cos \omega t (\omega T_{\text{П}} + \text{tg} \omega t) + (1 - \Pi_3)}{2T_{\text{П}} (1 + \delta V \sin \omega t)}; \\ B = \frac{\delta V \cos \omega t}{T_{\text{П}} (1 + \delta V \sin \omega t)}, \end{array} \right. \quad (4)$$

где A – коэффициент, определяемый эффективной пористостью материала; B – коэффициент, зависящий от объема емкости I и скорости

его изменения; $\delta V = \Delta V / V$ – относительное изменение объема емкости I ; $T_n = V_n / \alpha_n RT$ – время заполнения пор; $\Pi_3 = V_n / V_0$ – эффективная пористость.

На основании полученной математической зависимости нами был разработан пневмодинамический частотный метод измерения эффективной пористости материалов. Сущность рассматриваемого метода заключается в следующем: в герметичную емкость помещают образец сыпучего материала и создают гармонические колебания давления. О пористости сыпучего вещества судят по изменению параметров, соответствующих резонансу давления в образованной колебательной системе. Информативными являются такие параметры, как частота и амплитуда выходного сигнала.

Для реализации метода создана экспериментальная установка, структурная схема которой представлена на рис. 2. Данная установка включает в себя измерительный элемент ИЭ с контролируемым материалом, электродинамический генератор гармонически изменяющегося давления ЭДГ, электромагнитный преобразователь давления ЭМП, управляющее УУ и вычислительное ВУ устройства и устройство отображения информации УОИ. Функции УУ, ВУ и УОИ реализованы с использованием персонального компьютера ПК.

В ходе проведения серии опытов с пористыми материалами была получена амплитудно-частотная характеристика. В качестве исследуемых использовались углеродные материалы: каменный, древесный, активный (активный уголь представлен двумя марками БАУ-А и АГ-3). Полученные значения частоты и амплитуды представлены в табл. 1.

Анализ полученных результатов показывает, что активный уголь, обладающий большей пористостью по сравнению с другими видами угля, имеет самую низкую частоту возникновения резонанса, а амплитуда достижения резонанса имеет самое большое значение.

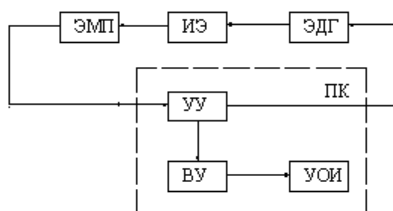


Рис. 2. Структурная схема экспериментальной установки

Таблица 1

| Наименование материала | Амплитуда возникновения резонансной частоты, дБ | Резонансная частота, Гц | Эффективная пористость, % |
|------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| Каменный уголь | 23,1 | 358,1 | 55,6 |
| Древесный уголь | 31,02 | 324,2 | 66,7 |
| Активный уголь БАУ-А | 39,93 | 306,2 | 75,5 |
| Активный уголь АГ-3 | 40,64 | 306,9 | 74,5 |

Каменный уголь, обладающий самой низкой пористостью из представленных образцов, имеет самую большую резонансную частоту и низкую амплитуду. Данная зависимость свидетельствует о том, что вещества, обладающие высокой пористостью, имеют высокое значение амплитуды достижения резонанса и низкую резонансную частоту.

Таким образом, данный способ и реализующее его устройство позволяют осуществлять измерение эффективной пористости сыпучих материалов путем сравнения частотно-амплитудных характеристик колебаний, причем измерения производятся непосредственно в емкости, содержащей образец, что позволяет повысить точность измерения.

К основным преимуществам данного метода можно отнести простоту его реализации; малое время проведения измерительных и вычислительных операций, что в целом означает снижение трудоемкости процесса определения пористости; обеспечение неразрушающего контроля за счет использования эффектов, возникающих при взаимодействии газовой фазы с сыпучим материалом. Также преимуществом является возможность проведения экспресс-анализа, что актуально при необходимости получения результатов в кратчайшие сроки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брюханов, Б.К. Измерение количества вещества, уровня, объема, давления, состава : учебное пособие / Б.К. Брюханов, Б.К. Григоровский, В.Н. Ерицев. – Куйбышев : КПТИ, 1986. – 90 с.
2. Деч, Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа / Г. Деч. – М. : Наука, 1965. – 288 с.