

ПНЕВМОДИНАМИЧЕСКОЕ ЧАСТОТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ПОРИСТОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Д.М. Мордасов, А.В. Рогудеева,
А.В. Медведева, С.В. Елифанов

*ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический
университет», г. Тамбов*

Рецензент д-р техн. наук, профессор В.Ф. Першин

Ключевые слова и фразы: амплитудно-частотная характеристика; измерение; пневмодинамическая измерительная система; пористость; резонанс; сыпучий материал; частотный метод.

Аннотация: Получено математическое описание процессов, происходящих в пневмодинамической измерительной системе, положенное в основу метода измерения пористости материалов путем анализа динамики изменения давления в свободном газовом пространстве при гармоническом возмущающем воздействии. Разработано устройство, позволяющее измерять эффективную пористость сыпучих материалов путем сравнения амплитудно-частотных характеристик колебаний.

В настоящее время актуальной является задача разработки неразрушающих, дешевых и простых по конструктивной реализации методов и средств измерения пористости различных материалов.

При производстве фильтров с использованием активированных углей основным показателем качества является их пористость; пористость нанотрубок позволяет оценивать емкость получаемого материала для хранения водорода; структура порового пространства катализаторов влияет на скорость химических процессов и выход готового продукта.

В условиях развития твердофазных технологий, теоретическое и экспериментальное исследование процессов, протекающих в пористых средах, является существенным как для получения новых материалов, так и для применения пористых материалов в различных отраслях науки и техники.

Мордасов Денис Михайлович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материалы и технология», e-mail: dmmordasov@rambler.ru; Рогудеева Анна Владимировна – магистрант кафедры «Материалы и технология», e-mail: rogyudeeva88@rambler.ru; Медведева Анна Валерьевна – магистрант кафедры «Материалы и технология», e-mail: Aneschka@yandex.ru; Елифанов Сергей Викторович – аспирант кафедры «Материалы и технология», e-mail: mit@mail.nnn.tstu.ru, ТамбГТУ, г. Тамбов.

Известные методики измерения пористости предусматривают заполнение порового пространства жидкостями с высокой проникающей способностью. При этом измеряют изменение объема жидкости, в которую погружен пористый материал. Таким методам присущи недостатки, вызванные необходимостью тщательного подбора иммерсионной жидкости, невысокая разрешающая способность, а также сложная аппаратная реализация.

Указанных недостатков лишены пневматические методы [3–5], наиболее перспективными из которых являются пневмодинамические [1], согласно которым в измерительной емкости создают гармонические изменения давления и о свойствах материала судят по изменению параметров колебаний на выходе системы.

На рисунке 1 представлена физическая модель пневмодинамической измерительной системы, которая включает в себя камеру 1 переменного объема, пневматическое сопротивление 2, являющееся аналогом сопротивления пор вещества, и камеру 3, характеризующую объем открытых пор.

Состояние газа в камере 1 согласно закону Клапейрона–Менделеева описывается уравнением

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

где V_{Γ} , θ_{Γ} , $P_{\text{вых}}$ – объем, масса и давление газа в камере 1 соответственно, м^3 , кг, Па; R – газовая постоянная, Дж/(кг·К); T – температура газа, К.

Объем камеры 1 подвергают гармоническим изменениям по закону

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

где V_0 – начальный объем камеры 1, м^3 ; ΔV – амплитуда изменений объема камеры 1, м^3 ; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота, рад/с; f – частота, Гц; t – время, с.

При изменении объема V_{Γ} начинается процесс заполнения открытых пор вещества. Через пневматическое сопротивление 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, м·с; $P_{\text{п}}$ – давление газа в камере 3, Па.

С другой стороны, расход G представляет собой скорость изменения масс газа в камерах 1 и 3, то есть

$$G = \frac{d\theta_{\Gamma}}{dt} = \frac{d\theta_{\text{п}}}{dt}. \quad (4)$$

При заполнении камеры 3 состояние газа в ней изменяется по закону Клапейрона–Менделеева

$$P_{\text{п}} V_{\text{п}} = \theta_{\text{п}} R T, \quad (5)$$

где $V_{\text{п}}$, $\theta_{\text{п}}$, $P_{\text{п}}$ – объем, масса и давление газа в камере 3 соответственно, м^3 , кг, Па.

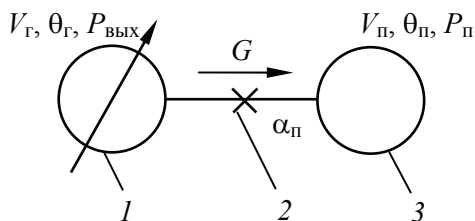


Рис. 1. Физическая модель пневмодинамической измерительной системы

Уравнения (1) – (5) образуют систему уравнений и представляют собой математическое описание процессов, происходящих в пневмодинамической измерительной системе.

Продифференцировав уравнения (1) и (5), получим

$$\begin{cases} V_{\Gamma}(t) \frac{dP_{\text{ВЫХ}}(t)}{dt} + P_{\text{ВЫХ}}(t) \frac{dV_{\Gamma}(t)}{dt} = RT \frac{d\theta_{\Gamma}(t)}{dt}; \\ V_{\Pi}(t) \frac{dP_{\Pi}(t)}{dt} = RT \frac{d\theta_{\Pi}(t)}{dt}; \\ V_{\Gamma}(t) = V_0 + \Delta V \sin \omega t; \\ G = \alpha_{\Pi} (P_{\text{ВЫХ}}(t) - P_{\Pi}(t)); \\ G = \frac{d\theta_{\Gamma}(t)}{dt} = \frac{d\theta_{\Pi}(t)}{dt}. \end{cases} \quad (6)$$

Решением системы (6) относительно $P_{\text{ВЫХ}}(t)$ является дифференциальное уравнение, описывающее динамику изменения давления в камере I при гармоническом изменении ее объема в виде

$$\frac{d^2 P_{\text{ВЫХ}}(t)}{dt^2} + K_1 \frac{dP_{\text{ВЫХ}}(t)}{dt} + K_2 P_{\text{ВЫХ}}(t) = 0, \quad (7)$$

где K_1, K_2 – коэффициенты, определяемые параметрами пористой среды и величиной возмущающего воздействия.

Уравнение (7) в области изображений (с учетом теоремы дифференцирования для оригинала [2]) имеет вид

$$s^2 P_{\text{ВЫХ}}(s) - s P_{\text{ВЫХ}}(+0) - P'_{\text{ВЫХ}}(+0) + K_1 s P_{\text{ВЫХ}}(s) - K_1 P_{\text{ВЫХ}}(+0) + K_2 P_{\text{ВЫХ}}(s) = 0, \quad (8)$$

где s – оператор Лапласа; $P_{\text{ВЫХ}}(s)$ – изображение функции $P_{\text{ВЫХ}}(t)$; $P_{\text{ВЫХ}}(+0)$, $P'_{\text{ВЫХ}}(+0)$ – предельные значения, к которым стремятся функции $P_{\text{ВЫХ}}(t)$, $P'_{\text{ВЫХ}}(t)$, когда t стремится к нулю справа.

Положив в уравнении (8) $P_{\text{ВЫХ}}(+0) = 0$, а $P'_{\text{ВЫХ}}(+0) = 1$, получим изображение функции $P_{\text{ВЫХ}}(t)$:

$$P_{\text{ВЫХ}}(s) = \frac{1}{s^2 + K_1 s + K_2}. \quad (9)$$

Решение дифференциального уравнения (7) находим при помощи обратного преобразования Лапласа в виде

$$\begin{cases} P_{\text{ВЫХ}}(t) = \frac{P_0 e^{-At}}{\sqrt{A^2 - B}} \operatorname{sh}(\sqrt{A^2 - B} t), \\ A = \frac{\delta V \cos \omega t (\omega T_{\Pi} + \operatorname{tg} \omega t) + (1 - \Pi_3)}{2 T_{\Pi} (1 + \delta V \sin \omega t)}, \\ B = \frac{\delta V \cos \omega t}{T_{\Pi} (1 + \delta V \sin \omega t)}, \end{cases}$$

где P_0 – начальное давление в камере I , Па; A – коэффициент, определяемый эффективной пористостью материала; B – коэффициент, зависящий от объема камеры I и скорости его изменения, c^{-1} ; $\delta V = \frac{\Delta V}{V_0}$ – относительное

изменение объема камеры I ; $T_{\Pi} = \frac{V_{\Pi}}{\alpha_{\Pi} RT}$ – время дросселирования при заполнении пор, с; $\Pi_3 = \frac{V_{\Pi}}{V_0}$ – эффективная пористость.

На основании полученной математической зависимости нами создан 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 материала судят по изменению параметров, соответствующих резонансу давления в образованной колебательной системе. Информативными являются такие параметры, как частота и амплитуда выходного сигнала.

Для реализации метода создано устройство, структурная схема которого представлена на рис. 2.

Устройство 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 экспериментов с пористыми материалами были получены амплитудно-частотные характеристики, несущие информацию об их пористости (рис. 3). В качестве исследуемых использовались углеродные материалы: каменный, древесный и активный (БАУ-А и АГ-3) уголь.

В таблице приведены значения частоты и амплитуды пневматического сигнала, соответствующие резонансу в пневмодинамической измерительной системе.

Анализ полученных результатов показывает, что активный уголь, обладающий бóльшей пористостью по сравнению с другими видами угля, имеет самую низкую частоту возникновения резонанса, а амплитуда давления при этом достигает максимального значения.

Наибольшая резонансная частота была достигнута при помещении в измерительную емкость каменного угля, имеющего самую низкую пористость из представленных образцов, при этом амплитуда была наименьшей.

Таким образом, пневмодинамический частотный метод и реализующее его устройство позволяют осуществлять измерение эффективной пористости

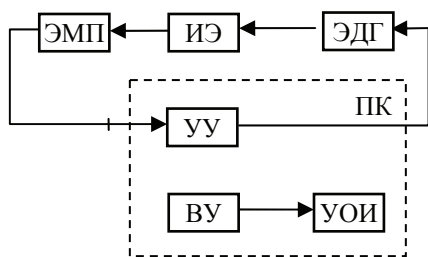


Рис. 2. Структурная схема устройства, реализующего пневмодинамический частотный метод измерения пористости сыпучих материалов

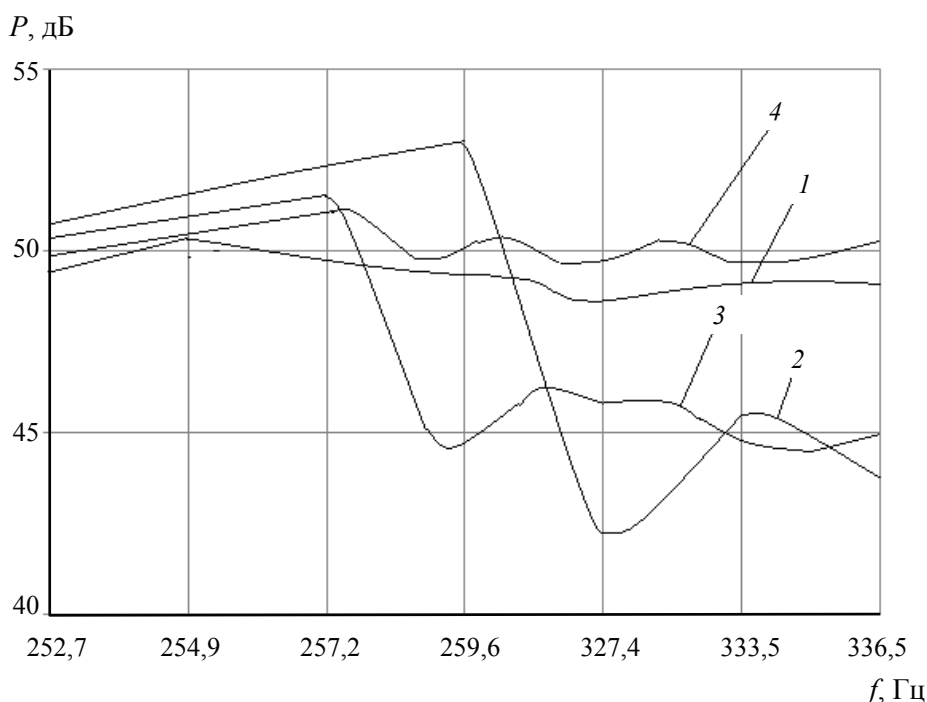


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики измерительного элемента с различными сыпучими материалами:

1 – каменный уголь; 2 – древесный уголь; 3 – активный уголь БАУ-А; 4 – активный уголь АГ-3

Результаты экспериментальной проверки пневмодинамического частотного метода измерения эффективной пористости сыпучих материалов

Наименование материала	Эффективная пористость, %	Амплитуда колебаний при резонансе, дБ	Резонансная частота, Гц
Каменный уголь	55,6	50,5	254,9
Древесный уголь	66,7	52,4	259,6
Активный уголь БАУ-А	75,5	51,9	257,2
Активный уголь АГ-3	74,5	51,6	257,4

сти сыпучих материалов путем сравнения амплитудно-частотных характеристик колебаний, причем измерения производятся непосредственно в емкости, содержащей образец, что позволяет повысить точность измерения.

К основным преимуществам разработанного 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, а также 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 : учеб. пособие / Б.К. Брюханов, Б.К. Григоровский, В.Н. Ерицев ; Куйбышев. политехн. ин-т. – Куйбышев : КПТИ, 1986. – 90 с.
2. Дёч, Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа / Г. Дёч. – М. : Наука, 1965. – 288 с.
3. Мордасов, Д.М. Пневмодинамический частотный метод измерения плотности сыпучих материалов / Д.М. Мордасов, А.В. Рогудеева // Теплофизические исследования и измерения при контроле, управлении и улучшении качества продукции, процессов и услуг : материалы VII Междунар. теплофиз. шк. / Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2010. – С. 143–145.
4. Мордасов, Д.М. Физические основы пневмодинамического измерения пористости веществ / Д.М. Мордасов, Н.А. Булгаков, М.М. Мордасов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2009. – Т. 15, № 3. – С. 661–666.
5. Мордасов, Д.М. Струйно-акустический контроль плотности сыпучих материалов / Д.М. Мордасов, М.М. Мордасов // Завод. лаб. Диагностики материалов. – 2006. – Т. 72, № 1. – С. 35–40.

Pneumodynamic Frequency Measurement of the Effective Porosity of Materials

**D.M. Mordasov, A.V. Rogudeeva,
A.V. Medvedeva, S.V. Epifanov**

Tambov State Technical University, Tambov

Key words and phrases: bulk material; the frequency method; frequency response function; measurement; pneumodynamic measuring system; porosity; resonance.

Abstract: Mathematical description of the processes occurring in pneumodynamic measuring system was obtained during the consideration of problems. This description is the basis for measuring the porosity of the material by analyzing the dynamics of pressure changes in the free gas space under harmonic forcing. The device can measure the porosity of granular materials by comparing the frequency response function of the oscillations.

© Д.М. Мордасов, А.В. Рогудеева,
А.В. Медведева, С.В. Епифанов, 2011