

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПНЕВМОДИНАМИЧЕСКОГО ИЗМЕРЕНИЯ ПОРИСТОСТИ ВЕЩЕСТВ

Д.М. Мордасов¹, М.М. Мордасов¹, Н.А. Булгаков²

*Кафедры: «Автоматизированные системы и приборы» (1),
«Физика» (2), ГОУ ВПО «ТГТУ»;
kafedra@asp.tstu.ru*

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: измерение пористости; объем пор; пневмодинамический метод.

Аннотация: Рассмотрены физические основы пневмодинамического измерения пористости, заключающиеся в использовании эффектов, возникающих при взаимодействии газа с пористым веществом, помещенным в измерительную емкость. На основе физического представления пневмодинамической измерительной системы в виде последовательного соединения газовых накопителей получено математическое описание в виде дифференциального уравнения 2-го порядка с начальными условиями, положенное в основу метода контроля пористости веществ.

Обозначения

P – пористость вещества, %;	t – время, с;
$P_{\text{Э}}$ – эффективная пористость, %;	T – абсолютная температура, К;
g_1, g_2 – мгновенные массовые расходы, кг/с;	$V_{\text{В}}$ – объем пористого вещества, м ³ ;
G_i – массовый расход газа при заполнении отдельной поры, кг/с;	$V_{\text{Г}}$ – объем газового пространства в измерительной емкости, м ³ ;
G – общий массовый расход газа при заполнении пор, кг/с;	$V_{\text{ИЗ}}$ – объем измерительной емкости, м ³ ;
$l_{\text{П}}$ – длина поры, м;	$V_{\text{П}}$ – суммарный объем открытых пор вещества, м ³ ;
l_0 – общая (суммарная) длина пор, м;	$\Delta P_{\text{Г}}$ – изменение давления в свободном газовом пространстве измерительной емкости, Па;
$M_{\text{Г}}$ – масса газа, подаваемого в измерительную емкость, кг;	ε – концентрация газовой фазы в измерительной емкости;
n – общее количество пор в веществе;	μ – коэффициент расхода;
$P_{\text{ВЫХ}}$ – давление в измерительной емкости, Па;	ρ – плотность газа заполняющего поры, кг/м ³ ;
$P_{\text{Н}}, P_{\text{К}}$ – начальное и конечное значения выбранного диапазона изменения выходного давления, Па;	$\rho_{\text{У}}$ – объемная плотность вещества, кг/м ³ ;
$P_{\text{П}}$ – давление в порах вещества, Па;	$\rho_{\text{И}}$ – истинная плотность вещества, кг/м ³ ;
R – газовая постоянная, Дж/(кг·К);	$\rho_{\text{К}}$ – кажущаяся плотность вещества, кг/м ³ ;
$S_{\text{П}}^2$ – площадь проходного сечения поры, м ² ;	τ – время изменения выходного давления от $P_{\text{Н}}$ до $P_{\text{К}}$, с.

Пористость, как отношение суммарного объема открытых пор к общему объему, занятому веществом, контролируют при периодическом контроле качества продукции, при геологической разведке, а также при входном контроле сырья и полупродуктов на предприятии-потребителе [1]. 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 непосредственно влияет на скорость химических процессов и выход готового продукта, производство компактных, миниатюрных конденсаторов требует разработки материалов с контролируемой развитой поверхностью и пористостью.

До настоящего времени проблема разработки неразрушающих, дешевых и простых по конструктивной реализации экспресс-методов измерения пористости веществ остается актуальной.

Большинство существующих методик измерения пористости [2–4, 6] предусматривает предварительное определение значений истинной и объемной плотности (преимущественно методами жидкостной пикнометрии [5]), после чего искомая величина определяется по формуле

$$\Pi = \left(1 - \frac{\rho_V}{\rho_{\text{и}}}\right) 100 \% \quad (1)$$

Точность измерения пористости такими методами в существенной степени зависит от выбранных способов измерения объемной и истинной плотностей материала. Поскольку измерение истинной плотности требует тщательного измельчения вещества до полного удаления из него газовых включений [3], то при проведении экспресс-контроля обычно определяют не истинную, а кажущуюся плотность $\rho_{\text{к}}$. При этом в формуле (1) $\rho_{\text{и}}$ заменяют на $\rho_{\text{к}}$ и определяют эффективную пористость [6]

$$\Pi_{\text{Э}} = \left(1 - \frac{\rho_V}{\rho_{\text{к}}}\right) 100 \%.$$

При определении кажущейся плотности методами жидкостной пикнометрии [5, 6] точность измерения зависит от способности жидкости проникать в поры малого размера, что требует тщательного подбора жидкости, кипячения полученной суспензии или вакуумирования. Это существенно усложняет процесс измерения и делает его длительным. Кроме того, точность таких методов измерения зависит от сорбционных свойств контролируемых материалов.

Пневмодинамические методы измерения плотности сыпучих материалов [7] лишены указанных недостатков и позволяют определять комплекс физико-механических характеристик веществ в едином измерительном процессе.

В качестве физической основы пневмодинамического метода измерения пористости, нами предложено использовать эффекты, возникающие при взаимодействии газа с пористым веществом, помещенным в измерительную емкость.

На рис. 1 представлена физическая модель пневмодинамической измерительной системы, согласно которой пористое вещество объемом $V_{\text{в}}$, помещенное в непроточную измерительную емкость объемом $V_{\text{из}}$ оставляет в ней свободное газовое пространство, объем которого равен

$$V_{\text{Г}} = V_{\text{из}} - V_{\text{в}}.$$

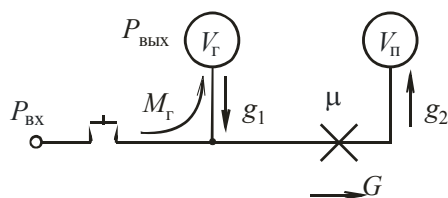


Рис. 1. Физическая модель пневмодинамической измерительной системы

В рассматриваемой физической модели в измерительную емкость с пористым веществом скачкообразно подается определенная масса газа M_{Γ} , при этом, согласно уравнению Клапейрона–Менделеева, давление в объеме V_{Γ} изменится на величину $\Delta P_{\Gamma} = M_{\Gamma}RT/V_{\Gamma}$, где $R = 287$ Дж/(кг·К) (для воздуха). После подачи газа в измерительную емкость начинается процесс заполнения газом открытых пор вещества, суммарный объем которых равен V_{Π} . Скорость заполнения определяется средним диаметром пор. Сопротивление потоку газа при заполнении отдельно взятой поры аналогично сопротивлению, оказываемому жиклером или диафрагмой. Массовый расход газа при заполнении поры определяется в виде [8, 9]

$$G_i = \mu S_{\Pi} \sqrt{2\rho} \sqrt{P_{\text{ВЫХ}} - P_{\Pi}},$$

где $\mu = 0,815$ [8].

Считая, что заполнение пор происходит одновременно, общий расход газа, поступающего в них, определим как сумму отдельных расходов G_i

$$G = \sum_{i=1}^n G_i = \mu n S_{\Pi} \sqrt{2\rho} \sqrt{P_{\text{ВЫХ}} - P_{\Pi}}.$$

Математическое описание процессов, происходящих в пневмодинамической измерительной системе, когда давления газа в емкостях V_{Γ} и V_{Π} изменяются во времени, получим после дифференцирования уравнения газового состояния в виде:

– для емкости V_{Γ} – $g_1 = G$, откуда

$$\frac{V_{\Gamma}}{RT} \frac{dP_{\text{ВЫХ}}}{dt} = \mu n S_{\Pi} \sqrt{2\rho} \sqrt{P_{\text{ВЫХ}} - P_{\Pi}}; \quad (2)$$

– для емкости V_{Π} – $G = g_2$, откуда

$$\mu n S_{\Pi} \sqrt{2\rho} \sqrt{P_{\text{ВЫХ}} - P_{\Pi}} = \frac{V_{\Pi}}{RT} \frac{dP_{\Pi}}{dt}. \quad (3)$$

Уравнения (2) и (3) образуют систему дифференциальных уравнений, являющуюся математическим описанием физических процессов, происходящих после скачкообразного изменения давления в измерительной емкости.

Выражая из уравнения (2) давление P_{Π} получим

$$P_{\Pi} = P_{\text{ВЫХ}} - \frac{V_{\Gamma}^2}{2\rho\mu^2 n^2 S_{\Pi}^2 R^2 T^2} \left(\frac{dP_{\text{ВЫХ}}}{dt} \right)^2. \quad (4)$$

Подстановка уравнения (4) в (3) дает выражение

$$\frac{V_{\Pi} V_{\Gamma}^2}{\rho\mu^2 n^2 S_{\Pi}^2 R^3 T^3} \frac{d^2 P_{\text{ВЫХ}}}{dt^2} + \frac{V_{\Gamma} - V_{\Pi}}{RT} = 0. \quad (5)$$

Дифференциальным уравнением (5) описывается динамика изменения давления в измерительной емкости в процессе заполнения пор вещества газом. Для решения уравнения (5) сгруппируем не изменяющиеся физические величины в правой части и введем начальные условия

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 P_{\text{ВЫХ}}}{dt^2} = \frac{\rho \mu^2 n^2 S_{\text{П}}^2 R^2 T^2 (V_{\text{П}} - V_{\text{Г}})}{V_{\text{П}} V_{\text{Г}}^2}, \\ P_{\text{К}} \leq P_{\text{ВЫХ}} \leq P_{\text{Н}}, \\ 0 \leq t \leq \tau. \end{array} \right. \quad (6)$$

После разделения переменных и интегрирования с указанными начальными условиями из (6) получим

$$n^2 S_{\text{П}}^2 \frac{(V_{\text{Г}} - V_{\text{П}})}{V_{\text{П}} V_{\text{Г}}^2} = \frac{2}{\rho \mu^2 R^2 T^2} \frac{P_{\text{Н}} - P_{\text{К}}}{\tau^2} \quad (7)$$

откуда после умножения числителя и знаменателя левой части на $V_{\text{П}}$, приняв $V_{\text{П}} = l_{\text{П}} n S_{\text{П}} = l_{\text{О}} S_{\text{П}}$, получим

$$\frac{1}{V_{\text{П}} V_{\text{Г}}} - \frac{1}{V_{\text{Г}}^2} = \frac{2}{n^2 S_{\text{П}}^2 \rho \mu^2 R^2 T^2} \frac{P_{\text{Н}} - P_{\text{К}}}{\tau^2}$$

или

$$\frac{1}{V_{\text{П}} V_{\text{Г}}} \frac{V_{\text{ИЭ}}^2}{V_{\text{ИЭ}}^2} - \frac{1}{V_{\text{Г}}^2} \frac{V_{\text{ИЭ}}^2}{V_{\text{ИЭ}}^2} = \frac{2}{n^2 S_{\text{П}}^2 \rho \mu^2 R^2 T^2} \frac{P_{\text{Н}} - P_{\text{К}}}{\tau^2}. \quad (8)$$

После группировки соответствующих членов в левой части выражения (8) получим

$$\frac{100}{\Pi_{\text{Э}}} = \frac{2V_{\text{ИЭ}}^2 \varepsilon}{n^2 S_{\text{П}}^2 \rho \mu^2 R^2 T^2} \frac{P_{\text{Н}} - P_{\text{К}}}{\tau^2} + \frac{1}{\varepsilon}$$

или

$$\Pi_{\text{Э}} = \frac{\varepsilon}{\frac{2V_{\text{ИЭ}}^2 \varepsilon^2 (P_{\text{Н}} - P_{\text{К}})}{n^2 S_{\text{П}}^2 \rho \mu^2 R^2 T^2 \tau^2} + 1} 100 \% . \quad (9)$$

Таким образом, мерой пористости, согласно уравнению (9), является время изменения давления в измерительной емкости на заданную величину.

Работа выполнена при поддержке РФФИ по проекту № 09-08-97583-р_центр_а и Министерства образования и науки РФ по теме НИР 2Г/09.

Список литературы

1. ГОСТ 4.200–78. Система показателей качества продукции. Строительство. Основные положения. – Переизд. май 2003 г. – Введ. 1979–07–01. – М. : Изд-во стандартов, 2003. – 7 с.
2. ГОСТ 12730.4–78. Бетоны. Методы определения показателей пористости. – Переизд. июня 2007– Взамен ГОСТ 12730–67 в части определения пористости ; введ. 1980–01–01. – М. : Стандартиформ, 2007. – 6 с.
3. ГОСТ 8269.0–97 . Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний. – Взамен ГОСТ 3344–83, ГОСТ 7392–85 в части мето-

дов физико-механических испытаний, ГОСТ 8269–87 ; введ. 1998–07–01. – М. : Изд-во стандартов, 1998. – 109 с.

4. ГОСТ 30629–99. Материалы и изделия облицовочные из горных пород. Методы испытаний. – Взамен ГОСТ 4001–84, ГОСТ 6666–81, ГОСТ 9480–89, ГОСТ 23342–91 в части определения коэффициента камненасыщения и предела прочности на растяжение при изгибе ; введ. 2001–01–01. – М. : ГУП ЦПП, 2000. – 37 с.

5. Мордасов, Д.М. Плотность сыпучих материалов и методы ее измерения (обзор) / Д.М. Мордасов, М.М. Мордасов // Завод. лаб. Диагностика материалов. – 2002. – Т. 68, № 6. – С. 16–22.

6. Paul, A. Webb. Volume and density determinations for particle technologists / A. Webb Paul // Micrometrics Instrument Corp., World Wide Web, 2001 : <http://www.micrometrics.com>. – Загл. с экрана.

7. Мордасов, Д.М. Пневмодинамические методы и устройства контроля плотности жидкостей и сыпучих материалов : дис. ... д-ра техн. наук : 05.11.13 : защищена 05.10.06 : утв. 13.04.07 / Мордасов Денис Михайлович. – Тамбов, 2006. – 257 с.

8. Ибрагимов, А.И. Элементы и системы пневмоавтоматики / А.И. Ибрагимов, Н.Г. Фарзане, Л.И. Илясов. – М. : Высшая школа, 1975. – 360 с.

9. Дмитриев, В.Н. Основы пневмоавтоматики / В.Н. Дмитриев, В.Г. Градецкий. – М. : Машиностроение, 1973. – 360 с.

Principal Physics of Pneumodynamic Measurement of Element Void Structure

D.M. Mordasov¹, M.M. Mordasov¹, N.A. Bulgakov²

*Departments “Automated Systems and Devices” (1),
“Physics” (2), TSTU; kafedra@asp.tstu.ru*

Key words and phrases: measurement of void structure; pneumodynamic method; void content.

Abstract: The paper reveals principal physics of pneumodynamic measurement of void structure; it's based on effects occurring in the course of gas interaction with porous substance placed in metering tank. On the basis of physical representation of pneumodynamic measuring system in the form of sequential linking of gas accumulators the mathematical description as differential equation of the second order with initial conditions is produced; the technique of control over element void structure is based on it.

Physikalische Gründe der pneumodynamischen Messung der Stoffenporosität

Zusammenfassung: Es sind die physikalischen Gründe der pneumodynamischen Messung der Porosität gezeigt. Sie gründen sich auf der Benutzung der Effekten, die bei der Zusammenwirkung des Gases mit dem porösen in den Meßbehälter hingelegeten Stoff entstehen. Auf Grund der physikalischen Vorstellung des pneumodynamischen Meßsystems als aufeinanderfolgende Kombination der Gasspeicher ist die mathematische Beschreibung als Differentialgleichung der 2.Ordnung mit den Anfangsbedingungen erhalten.

Bases physiques de la mesure pseudodynamique de la porosité des substances

Résumé: Sont déduites les bases physiques de la mesure pseudodynamique de la porosité des substances qui consistent dans l'utilisation des effets surgissant lors de l'interaction du gaz avec une substance poreuse. A la base de la représentation physique du système de la mesure pseudodynamique en vue de la liaison de l'accouplement en série des ensembles de gaz est reçue une description mathématique en vue de l'équation différentielle de 2-ème ordre avec les conditions initiales mises à la base de la méthode du contrôle de la porosité des substances.

Авторы: *Мордасов Денис Михайлович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизированные системы и приборы»; *Мордасов Михаил Михайлович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизированные системы и приборы»; *Булгаков Николай Александрович* – кандидат технических наук, заведующий лабораториями кафедры «Физика», ГОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Чуриков Александр Алексеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизированные системы и приборы», ГОУ ВПО «ТГТУ».
