

ПНЕВМОДИНАМИЧЕСКОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ПОРИСТОСТИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

**С.В. Епифанов, Н.А. Булгаков,
А.В. Трофимов, Д.М. Мордасов**

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

Рецензент В.Ф. Першин

Ключевые слова и фразы: измерение пористости; объем пор; пневмодинамический метод; сыпучий материал; физическая модель; экспресс-метод.

Аннотация: Проведены теоретические и экспериментальные исследования влияния пористости на скорость изменения давления в измерительной емкости с сыпучим материалом при скачкообразной подаче в нее газа с постоянным давлением. Предложен метод измерения пористости, позволяющий существенно сократить время эксперимента и повысить точность за счет использования в качестве информативного параметра скорости изменения давления газа в измерительной емкости при подаче на ее вход пневматического ступенчатого возмущающего воздействия.

Согласно «Системе показателей качества продукции» [1], для большинства продуктов в виде сыпучих материалов, используемых в строительстве в качестве каменных стеновых материалов, нерудных строительных материалов, неорганических пористых природных и искусственных заполнителей при изготовлении дорожных покрытий, пористость является показателем конструктивности или показателем назначения, знание которого необходимо при периодическом контроле качества и подборе состава строительной смеси, разработке стандартов, технических условий и других нормативных документов, аттестации продукции, выборе оптимального варианта новой продукции.

Пористость, как отношение суммарного объема открытых пор к общему объему, занятому сыпучим материалом, контролируют при перио-

Епифанов С.В. – магистрант кафедры «Автоматизированные системы и приборы» ТамбГТУ; Булгаков Н.А. – кандидат технических наук, ассистент кафедры «Физика» ТамбГТУ; Трофимов А.В. – кандидат технических наук, профессор кафедры «Автоматизированные системы и приборы» ТамбГТУ; Мордасов Д.М. – доктор технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные системы и приборы» ТамбГТУ.

дическом контроле качества на предприятии-изготовителе, при геологической разведке, а также при входном контроле на предприятии-потребителе.

До настоящего времени проблема разработки неразрушающих, дешевых и простых по конструктивной реализации экспресс-методов измерения пористости сыпучих материалов 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 искомый параметр определяют по формуле

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

где Π – пористость, %; ρ_V – объемная плотность частиц сыпучего материала, кг/м^3 ; $\rho_{и}$ – истинная плотность частиц сыпучего материала, кг/м^3 .

Точность измерения пористости такими методами в существенной степени зависит от выбранного способа измерения объемной и истинной плотностей материала. Поскольку измерение истинной плотности требует тщательного измельчения сыпучего материала до полного удаления из него газовых включений [3], то при проведении экспресс-контроля обычно определяют не истинную, а кажущуюся плотность. При этом формула (1) примет вид

$$\Pi_э = \left(1 - \frac{\rho_V}{\rho_к} \right) \cdot 100\%,$$

где $\Pi_э$ – эффективная пористость [6], %; $\rho_к$ – кажущаяся плотность частиц сыпучего материала, кг/м^3 .

При определении кажущейся плотности методами жидкостной пикнометрии [5, 6] точность измерения зависит от способности жидкости заполнять (проникать) поры малого размера, что требует тщательного подбора жидкости, кипячения полученной суспензии или вакуумирования. Это существенно усложняет процесс измерения и делает его длительным. На точность методов, основанных на заполнении измерительной емкости газом [5, 6], оказывают влияние колебания атмосферного давления и температуры окружающей среды. Пневмодинамические методы измерения плотности сыпучих материалов [7] лишены указанных недостатков и позволяют определять комплекс физико-механических характеристик сыпучих материалов в едином измерительном процессе.

В качестве физической основы пневмодинамического метода измерения пористости нами предложено использовать эффекты, возникающие при динамическом взаимодействии газа с сыпучим материалом (СМ).

На рис. 1 представлено устройство, реализующее пневмодинамический метод измерения, согласно которому пористость частиц СМ определяют по величине временного интервала, в течение которого давление в измерительной емкости изменяется на заданную величину при заполнении ее воздухом с постоянным расходом.

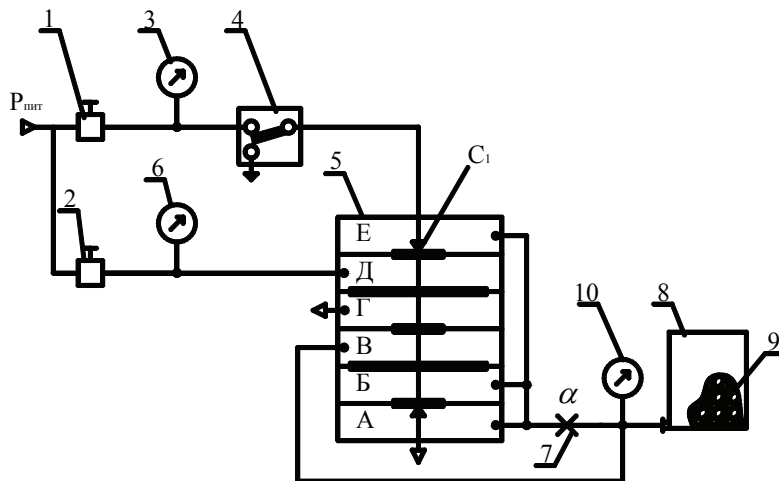


Рис. 1. Схема устройства, реализующего пневмодинамический метод

Устройство работает следующим образом. Давление питания $P_{\text{пит}}$ от компрессора поступает на вход редукторов 1 и 2. С выхода редуктора 1 давление, контролируемое по манометру 3, поступает на вход пневмотумблера 4 и, далее, в сопло питания C_1 пятимембранного элемента сравнения 5. Давление, регулируемое редуктором 2 и контролируемое по манометру 6, поступает в камеру Д элемента сравнения 5. С выхода элемента сравнения давление поступает на вход дросселя 7, выход которого подключен к измерительной емкости 8, заполненной контролируемым веществом 9. Изменение давления в емкости 8 контролируется по манометру 10.

В настоящее время разработаны и применяются для расчета параметров пористости различные физические модели [8, 9]. Для получения математического описания процессов, происходящих в измерительной емкости 8, предложено рассматривать пористую структуру сыпучего материала в виде пневматического апериодического звена I порядка (рис. 2).

При этом проводимость $\alpha_{\text{п}}$ – есть суммарная проводимость открытых пор сыпучего материала, объем емкости $V_{\text{п}}$ – суммарный объем этих пор.

Таким образом, схема, представленная на рис. 1, с учетом выбранной физической модели (см. рис. 2), может быть преобразована в схему, приведенную на рис. 3, где приняты следующие обозначения: P_3 – заданное давление; α – проводимость постоянного дросселя; V_1 – объем газового пространства между частицами в измерительной емкости без учета объема пор.

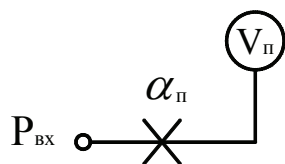


Рис. 2. Физическая модель пористой структуры

Для получения математической зависимости, связывающей скорость изменения давления $P_{\text{вых}}$ с величинами α , V_1 , $\alpha_{\text{п}}$, $V_{\text{п}}$, составим структурную схему устройства (рис. 4) и проанализируем ее.

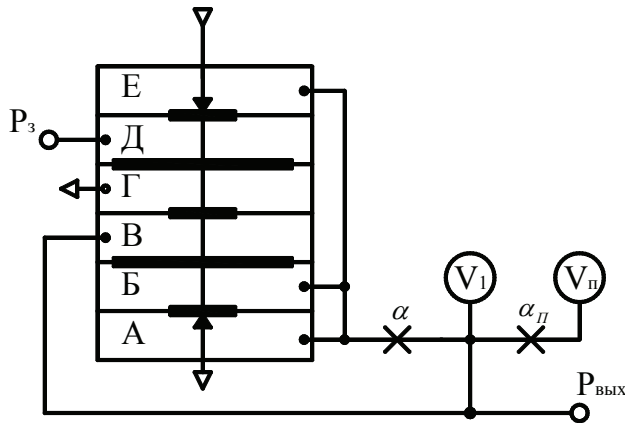


Рис. 3. Принципиальная пневматическая схема измерительного устройства

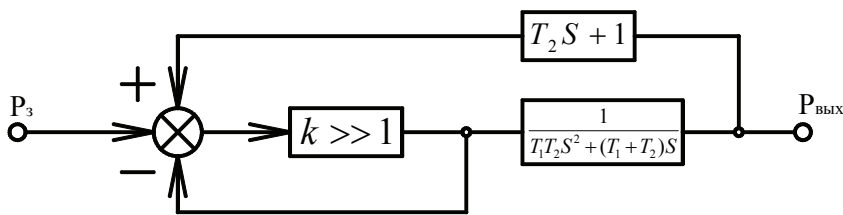


Рис. 4. Структурная схема устройства

Передаточная функция устройства имеет вид

$$W(S) = \frac{P_{\text{вых}}(S)}{P_3(S)} = \frac{1}{T_1 T_2 S^2 + (T_1 + T_2) S}, \quad (2)$$

где $T_1 = \frac{V_1}{R\theta\alpha}$, $T_2 = \frac{V_{\text{п}}}{R\theta\alpha_{\text{п}}}$ – постоянные времени; θ – температура газа;

R – газовая постоянная (для воздуха $R = 287$ Дж/(кг·К)); S – оператор Лапласа.

Уравнение выходного сигнала $P_{\text{вых}}(S)$ из (2) получим в виде

$$P_{\text{вых}}(S) = W(S)P_3(S) = \frac{P_3(S)}{T_1 T_2 S^2 + (T_1 + T_2) S}. \quad (3)$$

Взяв обратное преобразование Лапласа от выражения (3), получим зависимость, связывающую изменение давления в измерительной емкости во времени с параметрами физической модели

$$P_{\text{вых}}(t) = \left[\frac{T_1 T_2}{(T_1 + T_2)^2} e^{-\frac{T_1 + T_2}{T_1 T_2} t} + \frac{1}{T_1 + T_2} t - \frac{T_1 T_2}{(T_1 + T_2)^2} \right] P_3,$$

откуда скорость изменения давления в измерительной емкости

$$\frac{dP_{\text{ВЫХ}}}{dt} = \frac{1}{T_1 + T_2} \left(1 - e^{-\frac{T_1 + T_2}{T_1 T_2} t} \right) P_3,$$

или с учетом T_1 и T_2

$$\frac{dP_{\text{ВЫХ}}}{dt} = \frac{RT\alpha\alpha_{\Sigma\Pi}}{V_1\alpha_{\Sigma} + V_{\Pi}\alpha} \left(1 - e^{-\frac{(V_1\alpha_{\Sigma} + V_{\Pi}\alpha)RT}{V_1V_{\Pi}} t} \right) P_3. \quad (4)$$

После разделения переменных в уравнении (4) и интегрирования в пределах изменения давления $P_{\text{ВЫХ}}$ от 0 до P_3 за время Δt получим

$$\Delta t = \frac{V_1\alpha_{\Sigma} + V_{\Pi}\alpha}{R\theta\alpha\alpha_{\Sigma}},$$

откуда с учетом $V_1 = V_{\text{из}} - \frac{m}{\rho_k} + V_{\Pi}$, где m – масса пробы сыпучего материала; $V_{\text{из}}$ – объем измерительной емкости δ ; ρ_k – кажущаяся плотность частиц сыпучего материала; $\alpha_{\Sigma} = \frac{\rho r_{\Pi}^2 V_{\Pi}}{8\eta \cdot \prod_{i=1}^n l_i}$ – суммарная проводимость всех

газовых пор; r_{Π} – средний радиус пор; ρ , η – плотность и вязкость газа, подаваемого в измерительную емкость; l_i – длина i -ой поры,

$$\Delta t = \left[\frac{V_{\text{из}}}{R\theta\alpha} - \frac{m}{\rho_k R\theta\alpha} \right] + V_{\Pi} \left[\frac{1}{R\theta\alpha} + \frac{8\eta \prod_{i=1}^n l_i}{R\theta\pi\rho r_{\Pi}^4} \right]. \quad (5)$$

Анализ величин слагаемых, входящих в формулу (5), показал, что

$\frac{1}{R\theta\alpha} \gg \frac{8\eta \prod_{i=1}^n l_i}{R\theta\pi\rho r_{\Pi}^4}$, поэтому ее можно представить в виде

$$\Delta t = A + BV_{\Pi},$$

где $A = \frac{V_{\text{из}}}{R\theta\alpha} - \frac{m}{\rho_k R\theta\alpha}$; $B = \frac{1}{R\theta\alpha}$, откуда

$$V_{\Pi} = C\Delta t - D,$$

где $C = R\theta\alpha$; $D = V_{\text{из}}R\theta\alpha - V_k$; V_k – кажущийся объем сыпучего материала.

При известном объеме сыпучего материала $V_{\text{см}}$ пористость определим в виде

Таблица 1

Результаты экспериментальной проверки пневмодинамического метода измерения пористости сыпучих материалов

Вещество	$\rho_k, \text{г/см}^3$	$\Pi_{\text{обр}}, \%$	$\Delta t, \text{с}$	$\Pi_{\text{изм}}, \%$	$\delta, \%$
Уголь каменный мелкий	1,58	56	26	52,6	5,4
Цемент	1,92	61	33	56,7	5,9
Гипс	1,50	64	31	59,0	4,7

Примечание. $\rho_k, \Pi_{\text{обр}}$ – кажущаяся плотность и пористость по данным [10]; δ – относительная погрешность измерения пористости.

$$\Pi = \frac{V_{\text{п}}}{V_{\text{см}}} \cdot 100\% = \frac{C\Delta t - D}{V_{\text{см}}} \cdot 100\%. \quad (6)$$

Таким образом, методика измерения пористости с помощью устройства, представленного на рис. 1, состоит в следующем:

– по манометру 6 с помощью редуктора 2 устанавливают рабочее давление ($P_3 = 0,4 \text{ кгс/см}^2$);

– помещают навеску сыпучего материала в измерительную емкость и измеряют время Δt достижения давлением заданного значения P_3 ;

– по известному значению объема материала и времени Δt рассчитывают пористость сыпучего материала по формуле (6).

В табл. 1 приведены результаты измерений и оценка погрешности пневмодинамического метода измерения пористости сыпучих материалов.

В ходе эксперимента, проведенного при нормальных условиях, использованы: измерительная емкость объемом $V_{\text{из}} = 10^{-4} \text{ м}^3$, постоянный дроссель 7 с проводимостью $\alpha = 0,99 \cdot 10^{-10} \text{ м} \cdot \text{с}$, объем сыпучих материалов $V_{\text{см}} = 7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$.

На основании анализа полученных результатов можно сделать вывод, что погрешность измерения пористости устройством, реализующим разработанный метод, не превышает 6 %, а само устройство может быть использовано для экспресс-контроля пористости.

Разработанное устройство обладает рядом преимуществ, таких как простота конструкции, малое время проведения измерений, возможность использования для измерений различных газов.

Список литературы

- ГОСТ 4.200–2003. Система показателей качества продукции. Строительство. Основные положения. – М. : Изд-во стандартов, 2003. – 20 с.
- ГОСТ 12730.4–2002. Бетоны. Методы определения показателей пористости. – М. : Изд-во стандартов, 2003. – 20 с.
- ГОСТ 8269.0–97. Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний. – М. : Изд-во стандартов, 2003. – 20 с.

4. ГОСТ 30629–99. Материалы и изделия облицовочные из горных пород. Методы испытаний. – М. : Изд-во стандартов, 2003. – 20 с.
5. Мордасов, Д.М. Плотность сыпучих материалов и методы ее измерения (обзор) / Д.М. Мордасов, М.М. Мордасов // Заводская лаборатория. 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: <http://www.micrometritics.com>. – 2001, 16 p.
7. Мордасов, Д.М. Пневмодинамические методы и устройства контроля плотности жидкостей и сыпучих материалов : дис. ... докт. техн. наук. спец. 05.11.13. / Мордасов Денис Михайлович. – Тамбов, 2007. – 257 с.
8. Муштаев, В.И. Сушка дисперсных материалов / В.И. Муштаев, В.М. Ульянов. – М. : Химия, 1988. – 351 с.
9. Товбин, Ю.К. Теория физико-химических процессов на границе газ – твердое тело / Ю.К. Товбин. – М. : Наука, 1990. – 287 с.
10. Макаров, Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю.И. Макаров. – М. : Машиностроение, 1973. – 216 с.

Pneumatic Dynamic Measurement of Grain Materials Porosity

S.V. Epifanov, N.A. Bulgakov, A.V. Trofimov, D.M. Mordasov

Tambov State Technical University, Tambov

Key words and phrases: porosity measurement; pores volume; pneumatic dynamic method; grain material; physical model; express method.

Abstract: Theoretical and experimental research into porosity influence on the velocity of pressure changing in a measuring tank with grain material under stick-slip feeding of gas with permanent pressure is done. The technique of measuring porosity is proposed; it enables to reduce the time of the experiment and improve its accuracy since the gas pressure velocity change in a measuring tank while feeding pneumatic stick-slip disturbing influence is used as informative parameter.

© С.В. Епифанов, Н.А. Булгаков,
А.В. Трофимов, Д.М. Мордасов, 2007