

8. Caramia, M. Multi-objective Management in Freight Logistics Increasing Capacity, Service Level and Safety with Optimization Algorithms / M. Caramia, P. Dell'Olmo. – Springer Science+Business Media, 2008. – ISBN 978-1-84800-381-1.
9. Eichfelder, G. Adaptive Scalarization Methods in Multiobjective Optimization / G. Eichfelder. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. – ISBN 978-3-540-79157-7.
10. Marler, R.T. Survey of multi-objective optimization methods for engineering / R.T. Marler, J.S. Arora. – Structural and Multidisciplinary Optimization, 2004. – No. 26. – P. 369–395.

**Логунова Оксана Сергеевна** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой вычислительной техники и программирования ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». E-mail: logunova66@mail.ru.

**Сибилева Наталья Сергеевна** – магистрант кафедры вычислительной техники и программирования ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». E-mail: natus224@gmail.com.

**Павлов Владимир Викторович** – ведущий инженер технолог электросталеплавильной лаборатории Научно-технического центра ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

---

Логунова О.С., Сибилева Н.С., Павлов В.В. Результаты сравнительного анализа решения многокритериальной задачи оптимизации для расчета структуры шихтовых материалов дуговой сталеплавильной печи // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2014. – №2. – С. 54-64.

Logunova, O.S., Sibileva, N.S. and Pavlov, V.V., 2014. The results of comparative analysis of solving multicriteria problems optimization for calculation the structure of charge materials for electric arc furnace. Software of systems in the industrial and social fields, 2: 54-64.

---

УДК 66.041.2-52

## ГАЗОВОЛЮМЕТРИЧЕСКИЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТКРЫТОЙ ПОРИСТОСТИ, СВЯЗАННЫЙ С ИЗМЕРЕНИЕМ ОБЪЁМА СКЕЛЕТА КЕРНОВОГО МАТЕРИАЛА

*Шамирзаев С.Х., Абдугафуров А.М., Леднов А.В.*

**Аннотация.** Существующий газоволлюметрический способ определения открытой пористости, связанный с измерением объёма скелета кернового материала, не позволяет получать необходимые экспрессность и точность измерения. В работе предлагается математическая модель и принципиальная схема автономного прибора для определения открытой пористости кернового материала с применением микропроцессорной техники, рассматриваются вопросы подготовки эталонных образцов.

**Ключевые слова.** Пористость, точность измерения, автоматизированная установка.

### GAZOVOLYUMETRICHESKY METHOD FOR DETERMINING OPEN POROSITY ASSOCIATED WITH THE MEASUREMENT OF CORE MATERIAL VOLUME SKELETON

*Shamirzaev S.H., Abdugafur A.M., Lednov A.V.*

**Abstract.** Gazvolumetric method for determining open porosity associated with the measurement of core material volume skeleton. In this paper, we propose a mathematical model and the concept of an autonomous instrument for determining the open porosity of core samples using microprocessor technology, to consider the preparation of reference samples.

**Keywords.** Porosity, accuracy, automated installation.

### Актуальность работы

Существующий газоволлюметрический способ определения открытой пористости, связанный с измерением объёма скелета кернового материала не позволяет получать необходимые экспрессность и точность измерения. Это связано с использованием квазистатических процессов, что при отсутствии микропроцессорной техники приводит к необходимости тщательного термостатирования в течении длительного времени.

Целью данной работы является создание макета автономного прибора для определения открытой пористости кернового материала с применением микропроцессорной техники, позволяющей встроить вычислитель и управление непосредственно в прибор и обойтись без применения компьютера [1].

### Основные проблемы и решения

Современные микропроцессоры и микроконтроллеры имеют достаточные ресурсы и быстродействие для проведения сложных вычислений и управления установкой в ходе всего

процесса измерений. Они также содержат широкий набор аппаратных средств, необходимых для измерения и управления, таких как аналого-цифровой преобразователь с коммутатором, таймеры, счетчики, широтно-импульсные модуляторы, аналоговые компараторы, различные интерфейсы (*RS232, I2C, TWI, SPI*) и т.п. Наличие готовых функциональных узлов упрощает схемотехническую часть установки, снижает общую стоимость, энергопотребление, массу и габариты. Одновременно резко повышается надежность системы [2].

Применение микропроцессоров для автоматизации позволяет освободить оператора от рутинных действий, тем самым, устраняя возможность ошибок в последовательности и длительности отдельных операций, особенно при проведении многостадийных и многопараметрических измерений. Это, в свою очередь, повышает скорость, достоверность и удобство работы с установками.

### Принцип действия автоматизированной одноканальной установки для определения открытой пористости образцов керна материала

В основе построения прибора для определения открытой пористости керна материала лежит принцип определения объема скелета образца с помощью двух эталонных образцов с известными и разными объемами скелетов.

Предположим, что прибор может измерить некоторую величину  $N = f(V_s)$ , где  $N$  – показания прибора,  $V_s$  – объем скелета образца, а  $f(V_s)$  – функция зависимости показаний от объема скелета.

В этом случае для первого эталона с  $V_{s1}$  имеем  $N1$ , для второго эталона с  $V_{s2}$  имеем  $N2$ , а для образца с неизвестным  $V_{sx}$  должны получить после измерения величину  $Nx$ . С помощью известных показаний для двух известных объемов скелетов эталонов однозначно определяются коэффициенты зависимости  $f(V_s)$  и, тогда  $V_{sx} = f^*(N_x)$ , где  $f^*(N_x)$  – функция, обратная функции  $f(V_s)$ .

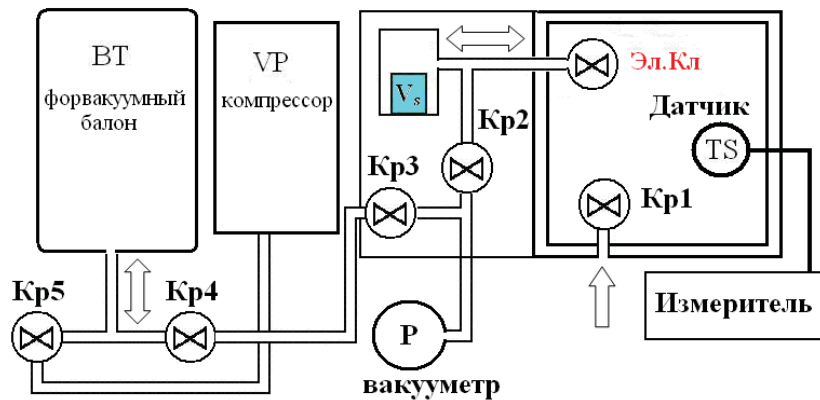


Рис.1. Упрощенная схема установки

В качестве измеряемого параметра в установке для определения открытой пористости использован перепад давления, возникающий во вспомогательной камере после открывания клапана между рабочей камерой с образцом и предварительно откачанным воздухом и вспомогательной камерой, внутри которой воздух находился при атмосферном давлении. Для пояснения принципа действия установки обратимся к упрощенной схеме установки для определения открытой пористости образцов керна материала, приведенной на рис.1.

Образец с объемом скелета  $V_s$  помещается в рабочую камеру с объемом  $V_w$ . После этого открываются клапаны Кл1 и Кл3. Клапан Кл2 остается закрытым. В рабочей камере  $V_w$  с образцом с помощью компрессора устанавливается пониженное давление  $P_0$ , а во вспомогательной камере  $V_a$  устанавливается давление  $P$ , равное атмосферному давлению  $P_a$ . Когда давления в камерах установлены, клапаны Кл1 и Кл3 закрываются и производится измерение давления с помощью датчика давления  $PS$ , находящегося внутри вспомогательной камеры. Сразу после этого открывается клапан Кл2, соединяющий обе камеры между собой. В результате в камерах через некоторое время устанавливается давление  $P$ , для которого справедливо следующее выражение

$$P = (P_a \cdot P_a)/(V_a + V_w - V_s).$$

Следует отметить, что приведенное уравнение применимо только при условии, что давление  $P_0$  пренебрежимо мало в сравнении с давлением  $P_a$ , т.е.  $P_a \gg P_0$ . В идеальном случае  $P_0$  должно быть равно 0 (вакуум).

Давление  $P$  измеряется датчиком давления  $PS$ , а затем вычисляется перепад давления

$$dP = P_a - P = P_a - (P_a \cdot P_a)/(V_a + V_w - V_s) = P_a \cdot (1 - V_a/(V_a + V_w - V_s)) = P_a \cdot ((V_w - V_s)/(V_a + V_w - V_s)). \quad (1)$$

Легко видеть, что при фиксированном значении  $P_a$  перепад давления  $dP$  полностью определяется объемом скелета  $V_s$  образца. Таким образом, безразмерная величина  $N = dP/P_a$  для образца определяется только объемом его скелета  $V_s$ , т.к. величины  $V_w$  и  $V_a$  являются неизменными. Однако, для определения  $N$  необходимо точное знание величин  $V_a$  и  $V_w$ , которые, к тому же, изменяются под действием температуры. Учет такого изменения, как и точное измерение внутренних объемов камер, является весьма затруднительным. Поэтому можно для каждого измерения построить уравнение зависимости перепада давления  $dP$  (или  $N$ ) от объема скелета образца  $V_s$ .

Если измерить для первого эталона с известным объемом  $V_{s1}$

$$N_1 = (V_w - V_{s1})/(V_a + V_w - V_{s1}),$$

для второго эталона с известным объемом  $V_{s2}$

$$N_2 = (V_w - V_{s2})/(V_a + V_w - V_{s2}),$$

и для образца с неизвестным объемом скелета  $V_{sx}$

$$N_x = (V_w - V_{sx})/(V_a + V_w - V_{sx}),$$

то можно найти неизвестный объем  $V_{sx}$  через два известных объема  $V_{s1}$  и  $V_{s2}$ , вычислив коэффициенты уравнения, имеющего вид

$$N = A - K \cdot V_s,$$

где  $K$  и  $A$  – коэффициенты определяемые из значений  $N_1$  и  $N_2$ .

Последнее уравнение получено из предыдущих уравнений при условии

$$V_a \gg (V_w - V_s)$$

для всего диапазона  $V_w \geq V_s \geq 0$ , что на практике означает, что объем вспомогательной камеры должен быть существенно больше объема рабочей камеры. Тогда можно записать

$$V_a + V_w - V_{sx} \approx V_a \quad A = V_w/V_a, \quad K = 1/V_a.$$

Одновременно решается еще один важный вопрос, связанный с изменением температуры газа внутри вспомогательной камеры при снижении давления на величину  $dP$ . Это изменение температуры будет тем меньше, чем меньше  $dP/P_a$ , и при  $V_a \gg V_w$  может считаться пренебрежимо малым.

С учетом указанных допущений получаем для образцов с известными объемами  $V_{s1}$  и  $V_{s2}$  два уравнения

$$N_1 = A - K \cdot V_{s1}, \quad (2)$$

$$N_2 = A - K \cdot V_{s2}. \quad (3)$$

Из этих уравнений определяются коэффициенты  $A$  и  $K$ , по которым можно построить зависимость, учитывающую состояние определяющих параметров (температура окружающей среды, давление и влажность атмосферного воздуха, геометрические размеры рабочей и вспомогательной камер, передаточную функцию датчика давления и характеристику преобразования выходного сигнала датчика давления в величину  $N$  измерителя) системы на момент изменения  $N_1$  и  $N_2$ . Очевидно, что измерения должны проводиться непосредственно одно за другим за короткое время, когда указанные параметры могут считаться постоянными. Другими словами, с помощью двух эталонов производится своего рода калибровка установки, после чего для образца с неизвестным объемом скелета  $V_{sx}$  измеряется

$$N_x = A - K \cdot V_{sx} \quad (4)$$

и вычисляется искомая величина

$$V_{sx} = (A - N_x)/K. \quad (5)$$

На практике для определения объема скелета исследуемого образца необходимо произвести измерение  $N_1$  для эталона с  $V_{s1}$  и  $N_2$  для эталона с  $V_2$ , а затем вычислить коэффициенты

$$A = (N_2 \cdot V_{s1} - N_1 \cdot V_{s2}) / (V_{s1} - V_{s2}), \quad (6)$$

$$K = (N_2 - N_1) / (V_{s1} - V_{s2}). \quad (7)$$

После этого можно измерить  $N_x$  для эталона с  $V_{sx}$  и, воспользовавшись уравнением (5) вычислить

$$V_{sx} = (V_{s1} \cdot (N_2 - N_x) + V_{s2} \cdot (N_x - N_1)) / (N_2 - N_1). \quad (8)$$

Полученные уравнения позволяют проанализировать источники погрешности объема скелета образца.

Очевидно, что объемы скелетов  $V_{s1}$  и  $V_{s2}$  эталонных образцов не могут быть измерены в самой установке и должны быть определены каким-то другим способом, а значения этих величин лишь используются для вычислений. От того насколько определены эталонные значения, напрямую зависит результат измерения, причем результат по точности будет всегда хуже выведенных значений для эталонов в силу накопления ошибок при измерениях и вычислениях. Использовать в качестве эталонов пористые материалы не рекомендуется, т. к. объем их скелетов определяется, в лучшем случае, с точностью до нескольких процентов от геометрического объема образца. Поэтому эталонные образцы следует выбирать непористыми и правильной геометрической формы для которой можно точно просчитать объем, равный необходимому объему скелета пористого материала. Расчет объема эталона требуется проводить с максимально возможной точностью, для чего измерения его линейных размеров должно быть выполнено особо тщательно. Поясним это на примере. Допустим, что в качестве эталона металлический брусок с размерами  $30 \times 30 \times 50$  куб. мм (эталон примерно таких размеров используется в установке). Объем такого эталона составит 45000 куб. мм. При погрешности измерения линейных размеров всего в 0,05 мм погрешность измерения объема составит около 0.8%. Для образцов с меньшими размерами при той же погрешности измерения линейных размеров погрешность измерения объема будет еще хуже. При этом трудно рассчитывать, что точность измерения объема скелета пористого образца будет лучше 1-1,5%.

## Заключение

Таким образом, в работе для использования прибора в геологических подразделениях, занимающихся исследованиями кернового материала, при поиске и разведке полезных ископаемых разработан усовершенствованный прибор способный конкурировать с зарубежными приборами такого типа.

## Список используемых источников

1. Сараева, Г.Д. Структура порового пространства и фильтрующие свойства пород – коллекторов газа и нефти равнинного Дагестана. / Г.Д. Сараева, А.А. Ханин // Геология нефти и газа, 1970. – № 11. – С.37-39.
2. Гурбатова, И.П. Влияние структуры порового пространства на масштабный эффект при изучении фильтрационно-емкостных свойств сложнопостроенных карбонатных коллекторов. / И.П. Гурбатова, В.А. Кузьмин, Н.Н. Михайлов. // Геология нефти и газа, 2011. – № 2. – С. 74-82.

**Шамирзаев С.Х.** – д-р физ.-мат. наук, профессор, Ташкентский государственный технический университет им. Абу Райхана Беруни, Узбекистан.

**Абдугафуров А.М.** – Ташкентский государственный технический университет им. Абу Райхана Беруни, Узбекистан.

**Леднов Анатолий Викторович** – доцент кафедры вычислительной техники и программирования ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. И. Г. Носова». E-mail: alednov@mail.

---

Шамирзаев С.Х., Абдугафуров А.М., Леднов А.В. Газоволюметрический способ определения открытой пористости, связанный с измерением объема скелета кернового материала // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2014. – №2. – С. 64-67.

Shamirzaev, S.H., Abdugafur, A.M. and Lednov, A.V., 2014. Gazovolymetricheky method for determining open porosity associated with the measurement of core material volume skeleton. Software of systems in the industrial and social fields, 2: 64-67.