**УДК 539.217.5:620.11:53.089.68**

**Совершенствование метрологического обеспечения измерений коэффициента газопроницаемости**

Аронов И.П.

Уральский научно-исследовательский институт метрологии – филиал   
Федерального государственного унитарного предприятия   
«Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева»   
(УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»)

Г. Екатеринбург, Россия

AronovIP@uniim.ru, https://orcid.org/0000-0001-8617-7445

**Аннотация.** Представлены результаты работ по повышению точности измерений коэффициента газопроницаемости методом стационарной фильтрации. Был разработан новый алгоритм обработки данных при измерении коэффициента абсолютной газопроницаемости горных пород методом стационарной фильтрации на основе объединения закона Дарси и уравнения Клинкенберга. Модельным (теоретическим) экспериментом методом Монте-Карло доказано, что предлагаемая модель обработки первичных данных обеспечивает в ~1,5 раза меньшие значения неопределенности коэффициента абсолютной газопроницаемости. Впервые экспериментально на основе измерений 50 корундовых образцов показано, что новый алгоритм обработки имеет в ~1,5 раза меньшие значения стандартной неопределенности коэффициентов абсолютной газопроницаемости. Экспериментально с помощью образцов со стеклянными капиллярами доказано, что результаты измерений, полученные на ГЭТ 210, в пределах неопределенности согласуются с теоретически рассчитанными значениями коэффициента газопроницаемости на основе объединений уравнений Дарси и Пуазейля.

**Ключевые слова:** газопроницаемость, закон Дарси, закон Пуазёйля, эффект Клинкенберга, коэффициент абсолютной газопроницаемости, стеклянные капилляры

Проницаемостью горной породы называется свойство пород пропускать жидкости, газы и их смеси при наличии градиента давления [1]. Данная величина очень важна для нефтедобывающей промышленности, так как позволяет оценить запасы нефти и газа, а также технологии разработки и продуктивность скважин. В качестве общей характеристики физических свойств горных пород используется абсолютная проницаемость - проницаемость пористой среды, определенная при наличии в ней одной фазы, химически инертной по отношению к породе. Для оценки абсолютной проницаемости часто используется воздух или газ (как правило, гелий и азот). Абсолютная проницаемость, оцененная с помощью газа называется коэффициентом абсолютной газопроницаемости (единицей величины является [м2]).

Для создания метрологического обеспечения измерений коэффициента абсолютной газопроницаемости УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» был разработан набор стандартных образцов газопроницаемости горных пород ГСО 11546-2020/ ГСО 11550-2020, аттестованных с помощью ГЭТ 210-2019 – Государственного первичного эталона единиц удельной адсорбции газов, удельной поверхности, удельного объёма пор, размера пор, открытой пористости и коэффициента газопроницаемости твердых веществ и материалов. Методика измерений, примененная при установлении метрологических характеристик стандартных образцов (далее – методика измерений) основана на методе, регламентированном в ГОСТ 26450.2-85 [2] – а именно на методе стационарной фильтрации. Измерение и расчет коэффициента абсолютной газопроницаемости производится согласно закону Дарси для газов (1) и с учетом эффекта Клинкенберга (2) [3-7]:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | **,** | (1) |

где: *K* - коэффициент газопроницаемости при заданном поровом давлении, м2; *Q* – объёмный расход газа при давлении *p*, м3/с; *p* – давление, при котором измеряется объёмный расход газа, Па; μ – вязкость газа, Па·с; *l* – длина исследуемого образца, м; *S* – площадь поперченного сечения исследуемого образца, м2; *pвх* и *pвых* – давления газа на входе и выходе исследуемого образца соответственно, Па;

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | **,** | (2) |

где: *Kabs* – коэффициент абсолютной газопроницаемости м2; b – константа Клинкенберга, зависящая от типа породы и фильтруемого газа, Па; *Ppor=(p1+p2)/2* – поровое давление, Па.

Таким образом, *Kabs* определяется путем измерения коэффициентов газопроницаемости при нескольких значениях порового давления и построения линейной регрессионной зависимости коэффициента газопроницаемости от обратного порового давления *K=f(1/Ppor)*, и экстраполяции данной зависимости в точку 1/Ppor=0. В большинстве случаев алгоритм вычисления *Kabs*, применяемый в методике измерений на ГЭТ 210, эффективен и позволяет определить *Kabs* с необходимой точностью. Однако, в практике измерений этой величины на различных образцах встречаются случаи невозможности определения *Kabs* с необходимой точностью, вследствие низкого значения коэффициента корреляции *R2* зависимости коэффициента газопроницаемости от обратного порового давления. Для решения этой проблемы УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» был предложен новый алгоритм обработки данных при измерении коэффициента абсолютной газопроницаемости, основанный на тех же самых законах – закон Дарси (1) и эффект Клинкенберга (2), что и алгоритм, используемый в методике измерений на ГЭТ 210 и ГОСТ 26450.2-85. В основе нового алгоритма лежат уравнения (3) и (4), полученные путем объединения и преобразования уравнений (1) и (2)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | **,** | (3) |
|  |  | (4) |

Уравнения (3) и (4) имеют размерность силы. Они описывают зависимость некой силы от порового давления в образце *F=f(Ppor)*. Коэффициент корреляции *R2* зависимости *F=f(Ppor)* во всех случаях имеет более высокие значения, нежели для зависимости *K=f(1/Ppor)*. Данный факт позволил сделать предположение, что точность определения коэффициента абсолютной газопроницаемости по новому алгоритму будет иметь преимущество по сравнению с существующей методикой. Для этого в среде MathCad методом Монте-Карло был проведен модельный эксперимент, который показал, что новый алгоритм обработки данных обеспечивает в 1,5 раза меньшие значения неопределенности коэффициента абсолютной газопроницаемости при незначимости разности между результатами, полученными разными методами. Помимо этого, с использованием нового алгоритма было обработано большое количество реальных измерений коэффициента абсолютной газопроницаемости (около 50 образцов). Обработка реальных данных также показала в среднем в 1,5 раза меньшие значения неопределенности коэффициента абсолютной газопроницаемости при использовании нового алгоритма.

Также, было проведено исследование проницаемости образцов со стеклянными капиллярами с известными значениями диаметров капилляра и образца [8]. Согласно закону Пуазейля, ламинарное течение через капилляр с постоянным радиусом описывается уравнением:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | **,** | (5) |

где *r* -радиус капилляра, м, *l* – длина капилляра, м.

Объединяя уравнение (5) с законом Дарси (1), получаем объединенное уравнение (6), позволяющее рассчитать проницаемость цилиндрического образца с радиусом *R*, во внутрь которого вмонтирован капилляр радиусом r:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | **,** | (6) |

Результаты измерений коэффициента газопроницаемости образцов с капиллярами, полученные с помощью ГЭТ 210, согласуются в пределах неопределенности с теоретически рассчитанными по уравнению (6) значениями коэффициента газопроницаемости.

**Заключение**

В результате проделанной работы был разработан новый алгоритм обработки данных при измерении коэффициента абсолютной газопроницаемости горных пород методом стационарной фильтрации на основе объединения закона Дарси и уравнения Клинкенберга. Модельным (теоретическим) экспериментом методом Монте-Карло доказано, что предлагаемая модель обработки первичных данных обеспечивает в ~1,5 раза меньшие значения неопределенности коэффициента абсолютной газопроницаемости. Впервые экспериментально на основе измерений 50 корундовых образцов показано, что новый алгоритм обработки имеет в ~1,5 раза меньшие значения стандартной неопределенности коэффициентов абсолютной газопроницаемости. Экспериментально с помощью образцов со стеклянными капиллярами доказано, что результаты измерений, полученные на ГЭТ 210, в пределах неопределенности согласуются с теоретически рассчитанными значениями коэффициента газопроницаемости на основе объединений уравнений Дарси и Пуазейля. В качестве перспективных международных работ на ближайшую перспективу предлагается проведение международных сличений под эгидой КООМЕТ для экспериментального опробования предлагаемой измерительной модели и по их результатам подготовка предложения по разработке международного стандарта ИСО Метод определения абсолютного коэффициента газопроницаемости горных пород методом стационарной фильтрации

**Список литературы**

1. Кобранова В.Н. Петрофизика. Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.:Недра, 1986. – 392 с

2. ГОСТ 26450.2-85 Породы горные. Метод определения коэффициента абсолютной газопроницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации. — Москва: Издательство стандартов, 1985. — 17с

3. Klinkenberg L.J. The permeability of porous media to liquids and gases // Am. Petroleum Inst. Drilling and Production Practice, 1941. Pp. 200–211

4. Kazemi M., Takbiri-Borujeni A., An analytical model for shale gas permeability, International Journal of Coal Geology, 2015, vol. 146, pp 188–197. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2015.05.010>

5. Wang S., Wu Y. S., Lukyanov A. A., Second-order gas slippage model for the Klinkenberg effect of multicomponent gas at finite Knudsen numbers up to 1, Fuel, 2019, vol. 235, pp 1275–1286. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.08.113>

6. Okwananke A., Hassanpouryouzband A., Vasheghani Farahani M., Yang J., Tohidi B., Chuvilin E., Istomin V., Bukhanov B., Methane recovery from gas hydrate-bearing sediments: an experimental study on the gas permeation characteristics under varying pressure, Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, vol. 180, pp. 435–444. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.05.060>

7. Аронов И. П., Собина Е. П. Разработка стандартных образцов газопроницаемости // Эталоны. Стандартные образцы. 2021. Т. 17. № 2. С. 5–18. https://doi.org/10.20915/2687-0886-2021-17-2-5-18 [Aronov I. P., Sobina E. P., Development of reference materials for gas permeability, Measurement standards. Reference materials. 2021, vol. 17 (2), pp. 5–18. https://doi.org/10.20915/2687-0886-2021-17-2-5-18 (In Russ.)]

8. Carlos A. Grattoni, Samuel Allshorn, Quentin J. Fisher, Determining gas permeability in tight rocks: How do we know if we are obtaining the right value? International Symposium of the Society of Core Analysts held in Snowmass, Colorado, USA, 21–26 August 2016, paper SCA2016–010 (2016)