



**РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
АДСОРБЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ УГЛЯ ПО ГАЗУ МЕТАНУ**

Л. А. Рыбалкин, Т. В. Шилова

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: Leonid.Rybalkin@gmail.com,
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

Разработана термостатированная установка для исследования адсорбционной способности и проницаемости угольного керна. Конструкция установки позволяет проводить насыщение керна метаном и фильтрацию газа при различных значениях осевого и бокового сжатия образца. Показано, что использование автоматизированной системы регистрации дифференциального давления и объемов газа во входном и выходном резервуарах исключают необходимость ручного контроля, что особенно важно при проведении продолжительных испытаний низкопроницаемых углей.

Уголь, метан, адсорбция, проницаемость, лабораторные исследования, установка

**DEVELOPMENT OF EXPERIMENTAL PLANT
FOR INVESTIGATION OF COAL ADSORPTIVE CAPACITY USING METHANE**

L. A. Rybalkin, and T. V. Shilova

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: Leonid.Rybalkin@gmail.com, Krasnyi pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

A thermostatic plant for studying the adsorptive capacity and permeability of coal core was developed. The plant design allows to saturate coal with methane and to filter gas at various values of axial and lateral compression of the sample. The use of an automated system for recording differential pressure and gas volumes in the inlet and outlet tanks eliminates the need for manual control, which is especially important during long-term testing of low-permeable coals.

Coal, methane, adsorption, permeability, laboratory tests, plant

При увеличении темпов и глубины подземной разработки газоносных угольных пластов возрастает необходимость своевременного и быстрого отвода метана и снижения его концентрации в пласте. Достижение степени извлечения газа, достаточной для безопасного ведения очистных работ, возможно только при проектировании дегазационных схем на основе геолого-физической модели углепородного массива, информации о его свойствах. Определение проницаемости угля, его газонасыщенности, сорбционной емкости и других критических параметров *in-situ* дает достоверные значения искомых величин, но не характеризует их зависимость от порового и горного давлений [1, 2], температуры и т. п. Чтобы создать реалистичную модель угольного пласта, требуется тщательное изучение указанных зависимостей в лабораторных условиях.

В настоящей работе представлена лабораторная установка для исследований проницаемости и сорбционной способности угля при фильтрации в нем метана. Автоматизированная система сбора данных позволяет исключить необходимость постоянного контроля за ходом экспериментов. Установка предназначена для получения зависимостей исследуемых величин от горного давления, давления газа и температуры — информации, используемой при проектировании дегазационных работ на угледобывающих шахтах.

Обзор методов измерения проницаемости образцов горных пород. Для лабораторных исследований проницаемости используют как правило цилиндрические образцы диаметром 30–50 мм и длиной 60–100 мм. При определении проницаемости по газу учитывают поправку на проскальзывание газа вдоль стенки порового канала (эффект Клинкенберга) [3]. Применяют следующие основные подходы:

Стационарный метод [4]. Исследования проводят при установившемся характере фильтрации вдоль оси цилиндрического образца. Его боковые стенки герметизируют, а у торцов поддерживаются постоянные и отличные друг от друга значения давления P_{in} и P_{out} ($P_{in} > P_{out}$) фильтрующегося агента (жидкость, газ) (рис. 1а) [5, 6]. Полагают, что во всем образце векторы скорости фильтрации равны по величине и перпендикулярны его торцам. Значение проницаемости k определяют по закону Дарси, который для жидкости имеет вид:

$$k = \frac{\mu L G}{S(P_{in} - P_{out})}, \quad (1)$$

где μ — динамическая вязкость жидкости; L — длина образца; S — площадь поперечного сечения образца; G — расход.

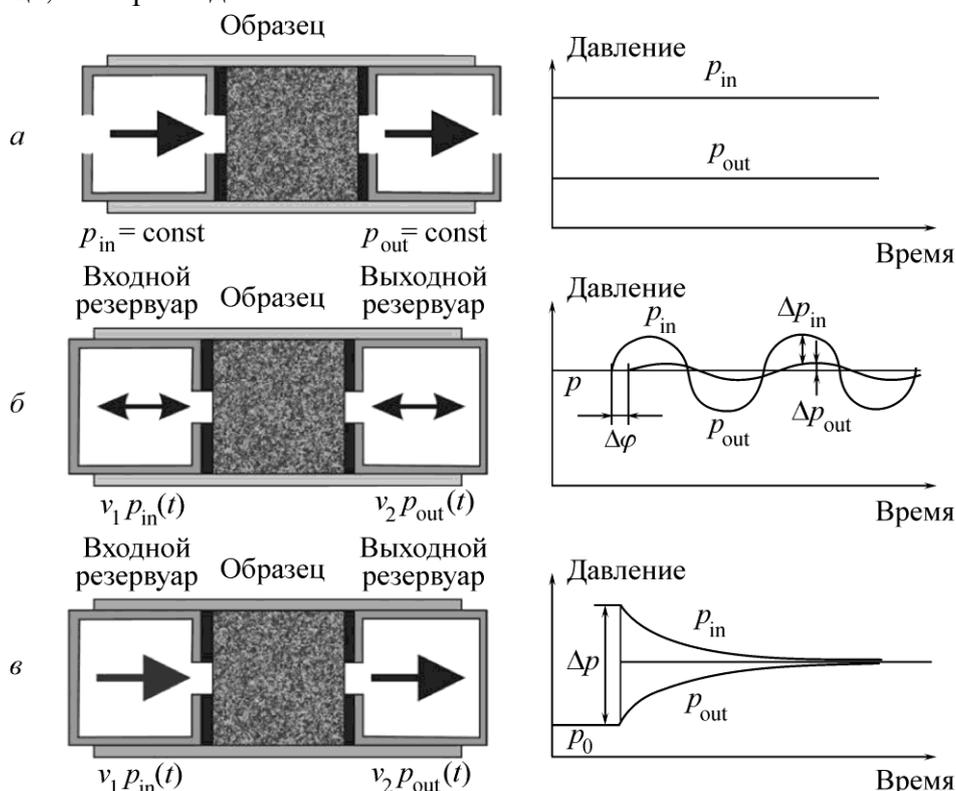


Рис. 1. Схемы измерения проницаемости: а — стационарным методом; б — методом осцилляции давления; в — нестационарным методом

Осцилляционный метод. При определении проницаемости с помощью осцилляционного метода давление флюида у входного торца образца меняется по периодическому закону (рис. 1б). Проницаемость образцов находят по отношению амплитуд и сдвига фаз колебаний давления флюида во входном и выходном резервуарах [7]. Преимуществом данного метода состоит в относительно малой продолжительности эксперимента. Модификации этой методики позволяют определить не только проницаемость, но и пористость образца. Измерения этим методом проводят при поровом давлении флюида около 1 МПа.

Метод затухания импульса давления. Метод затухания импульса давления, или нестационарный метод, разработан Брейсом [8]. Измерение проницаемости осуществляется следующим образом: входной и выходной торцы образца, изолированного по боковой поверхности, соеди-

няются с замкнутыми резервуарами (рис. 1в). В начальный момент давления флюида в образце и в обоих резервуарах одинаковы и равны P_0 . Затем во входном резервуаре давление газа увеличивают скачкообразно на небольшую величину $\Delta P \ll P_0$. За счет разности давлений между торцами образца флюид движется через образец. В результате давление флюида во входном резервуаре уменьшается, а в выходном резервуаре, наоборот, возрастает, пока не достигнет некоторого равновесного значения. Зависимости давления от времени в обоих резервуарах (P_{in} и P_{out}) фиксируются и используются для определения величины проницаемости.

СХЕМА ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Принципиальная схема разработанной лабораторной установки, реализующей рассмотренные методы, представлена на рис. 2.

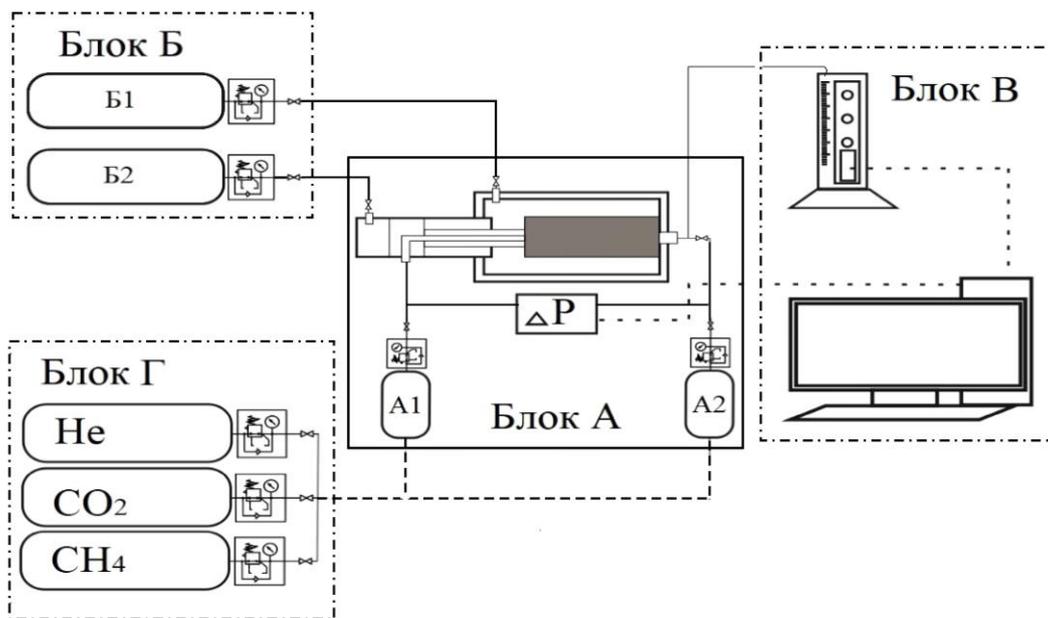


Рис. 2. Схема лабораторной установки

Образец горной породы помещается в камеру (блок А). Осевую и боковую нагрузки на образец создают давлением азота (блок Б). В качестве фильтрующегося агента в установке могут использоваться следующие газы (блок Г): метан, гелий, диоксид углерода.

Конструкция блока А обеспечивает возможность проведения экспериментов в широком диапазоне значений дифференциального и среднего (порового) давлений газа в образце, его осевого и бокового сжатия, температуры, имитирующих разнообразные условия в углепородном массиве. Фильтрация осуществляется с помощью баллонов малого объема А1 и А2, соединенных со входом и выходом камеры. При исследовании проницаемости стационарным методом баллон А2 не используют, а выход камеры соединяют с мерной колбой, заполненной непрозрачной жидкостью [9]. Объем вытесненной газом жидкости измеряют по высоте ее столба электронно-оптической системой.

Для проведения исследований методами осцилляции и затухания импульса давления баллоны могут быть дополнительно соединены вместе в батарее или подключены к дополнительной линии подачи контролируемых порций сжатого газа. Измерение адсорбции метана углем осуществляется объемным методом [10].

Основные элементы лабораторного комплекса показаны на рис. 3. Фильтрационная камера представляет собой модернизированную ячейку Хаслера, предельное давление в ее полости составляет 30 МПа, длина камеры в полной сборке 200 мм, ширина 60 мм (рис. 3в). Компактная конструкция позволяет размещать камеру в небольшом термостате (рис. 3б).



Рис. 3. Основные элементы лабораторного комплекса измерения проницаемости и адсорбционных свойств угля: *а* — танкер с метаном; *б* — термостат; *в* — элементы фильтрационной камеры; *г* — пневматическая система сжатия образца внешним давлением

Боковое и осевое сжатие образца создают с помощью баллонов Б1, Б2 (рис. 2, 3г) со сжатым азотом. Контроль давления в пределах от 0.01 до 15 МПа осуществляется электронными манометрами. После достижения необходимого уровня давления линии подачи сжатого газа перекрывают вентилями.

Для подачи метана используются специальные баллоны А1, А2 (рис. 2) малого объема Kovea КТ-2909 (Южная Корея). Эти баллоны объемом от 0.8 до 5.5 л имеют резьбовое соединение по стандарту MAPP US, что обеспечивает надежное подключение к линии фильтрации и поддержание перепада давления от 0.001 до 2 МПа. Заправка газом баллонов А1, А2 происходит через специальный узел от танкера большого объема (рис. 3а).

Регистрация объема профильтрованного газа при стационарном методе измерения проницаемости осуществляется по изменению высоты столба подкрашенной жидкости в специальной мерной колбе, которое фиксируется оптическими датчиками на платформе Arduino с последующей записью времени в специальном программном обеспечении на компьютер.

При исследованиях по методам осцилляции давления и затухания импульса давление или разница давлений регистрируются высокочувствительным датчиком SITRANS P (SIEMENS, Германия) с дальнейшим выводом значений на компьютер.

ВЫВОДЫ

Разработана лабораторная установка для исследования проницаемости и сорбционной способности угля в условиях горного давления до 30 МПа.

Конструкция обеспечивает возможность независимого регулирования дифференциального и среднего давления газа в образце.

Исследования фильтрационной способности угля стационарным и нестационарным методами могут проводиться по метану, гелию и диоксиду углерода, измерение абсорбции метана углем может выполняться объемным методом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Palmer I. and Mansoori J.** How permeability depends on stress and pore pressure in coalbeds: a new model, SPE Reserv. Eval. Eng., 1998, no. 6, pp. 539–544.
2. **Pan Z., Connell L., and Camilleri M.** Laboratory characterization of coal reservoir permeability for primary and enhanced coalbed methane recovery, Int. Journal of Coal Geology, 2010, vol. 82, no. 3, pp. 252–261.
3. **Klinkenberg L. J.** The permeability of porous media to liquids and gases, drilling and production practice, Am. Petroleum Inst., 1941, pp. 200–213.
4. **State Standard USSR 26450.2-85.** Methods for determining the absolute permeability of gas at stationary and non-stationary filtration, Moscow, Izd. standartov, 1985, 17 pp. (in Russian) [ГОСТ 26450.2-85. Методы определения коэффициента абсолютной газопроницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации. — М.: Изд-во стандартов, 1985. — 17 с.]
5. **Usol'tseva O. M., Semenov V. N., Serdyukov S. V., and Rybalkin L. A.** Laboratory studies of coal samples problems of core recovery, Mining Information Analytical Bulletin, 2018, no. S48, pp. 234–242. (in Russian) [Усольтцева О. М., Семенов В. Н., Сердюков С. В., Рыбалкин Л. А. Лабораторные исследования угольных образцов. Проблемы отбора керна // ГИАБ. — 2018. — № S48. — С. 234–242.]
6. **Rybalkin L. A. and Shilova T. V.** Dependence of coal permeability on compressive stresses: experimental study and model estimation results, Mining Information Analytical Bulletin, 2018, no. S49, pp. 138–147. (in Russian). [Рыбалкин Л. А., Шилова Т. В. Определение проницаемости угля в зависимости от сжимающих напряжений: результаты экспериментальных исследований и модельных оценок // ГИАБ. — 2018. — № S49. — С. 138–147.]
7. **Zhang R., Ning Z., Yang F., Zhao H., and Wang Q.** A laboratory study of the porosity-permeability relationships of shale and sandstone under effective stress, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2016, vol. 81, pp. 19–27.
8. **Brace W. F., Walsh J. B., and Frangos W. T.** Permeability of granite under highpressure, Journal of Geophysical Research, 1968, vol. 73, no. 6, pp. 2225–2236.
9. **Serdyukov S. V., Shilova T. V., and Drobchik A. N.** Laboratory installation and procedure to determine gas permeability of rocks, Journal of Mining Science, 2017, vol. 53, no. 5, pp. 954–961. [Сердюков С. В., Шилова Т. В., Дробчик А. Н. Лабораторная установка и методика определения газопроницаемости горных пород // ФТПРПИ. — 2017. — № 5. — С. 172–180.]
10. **Potokina R. R., Zhuravleva N. V., and Ismagilov Z. R.** Laboratory methods for determining the gas content of coal seams, Chemistry in the interests of sustainable development, 2013, vol. 21, pp. 519–523. [Потокина Р. Р., Журавлева Н. В., Исмагилов З. Р. Лабораторные методы определения газонасыщенности угольных пластов // Химия в интересах устойчивого развития. — 2013. — Т. 21. — С. 519–523.]