

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРИСТОСТИ ХРОМОВЫХ РУД

А.В. Сенин, В.П. Чернобровин, И.Ю. Пашкеев, О.В. Кузнецова

По существующим представлениям значительную роль в процессах восстановления твердых руд и рудных концентратов играет газовая фаза. По газовой фазе осуществляется доставка восстановителей к поверхности рудных материалов и отвод газообразных продуктов восстановления. Наличие пор позволяет идти процессу восстановления внутри кусков руды, что заметно улучшает показатели восстановления при прочих равных условиях.

В настоящей работе изучены характеристики пористости кусковых образцов хромовых руд некоторых месторождений Урала и Казахстана (рис. 1). Заметная пористость возникает в рудах после их нагрева до температур 700-1000 °С. Причиной увеличения пористости является термический распад компонентов вмещающей породы (серпентина и хлорита), сопровождающийся удалением конституционной воды в количестве 13,0—13,6 % от массы серпентина или хлорита."

Определялись следующие характеристики пористости:

1) теоретическое значение возможной пористости  $\Pi_{\text{теор}}$  - рассчитывали по массе удаленной конституционной воды;

2) объем образца  $V_{\text{обр}}$ , кажущаяся плотность  $\rho_{\text{каж}}$ , открывая пористость  $\Pi_{\text{откр}}$  - в соответствии с требованиями ГОСТ 2409-95 (ИСО 5017-88) «Огнеупоры. Метод определения кажущейся плотности, открытой и общей пористости, водопоглощения»;

3) истинная плотность  $\rho_{\text{ист}}$ , общая пористость  $\Pi_{\text{общ}}$ , закрывая пористость  $\Pi_{\text{закр}}$  - в соответствии с требованиями ГОСТ 2211-65 (ИСО 5018-83) «Огнеупоры и огнеупорное сырье. Методы определения плотности»;

4) распределение открытой пористости по размерам пор - методом математической обработки кинетической зависимости изменения массы образца в результате взаимного вытеснения одной жидкостью другую из пор образца, предварительно пропитанного первой жидкостью [1]. Метод дает результаты, одинаковые с методом ртутной порометрии.

В методе взаимного вытеснения, при соответствующем подборе вытесняющей и вытесняемой жидкостей, скорость вытеснения определяется только гидростатическим напором, умноженным на высоту образца, и внутренним трением при движении жидкости в капилляре. Ввиду малого размера капилляров перемешиванием жидкостей на границе раздела между ними обычно пренебрегают. В этом случае интегрирование уравнения

Пуазейля для скорости фильтрации дает следующую зависимость:

$$R^2 = \frac{H \cdot 8\eta \cdot \alpha}{(\rho_2 - \rho_1)g} \cdot \frac{1}{t}, \quad (1)$$

где  $R$  - гидравлический радиус капилляров;  $H$  - высота образца;  $\eta$  - вязкость вытесняемой жидкости;  $\rho_1$  - удельная масса вытесняемой жидкости;  $\rho_2$  - удельная масса вытесняющей жидкости;  $g$  - ускорение силы тяжести;  $\alpha$  - коэффициент извилистости капилляров;  $t$  - длительность полного вытеснения жидкости из капилляров радиусом  $R$ . В основе методики графоаналитической обработки [1] экспериментальных результатов лежит предположение, что полидисперсная пористость представляет собой сумму монодисперсных пористостей с определенной шкалой классификации. В том случае кривая изменения массы образца во времени представляется ломаной линией с шагом по времени  $t_i/t_{i-1} = 2$ , что отвечает отношению раз-

меров капилляров  $R_{i-1}/R_i = \sqrt{2}$ . По координатам ломаной линии вычисляется величина  $b_i$  - увеличение массы образца при замене вытесняемой жидкости вытесняющей жидкостью в капиллярах радиусами от  $R_{i-1}$  до  $R_i$ . Тогда объем  $W_i$  пор в этом же интервале радиусов составит

$$W_i = \frac{b_i}{\rho_2 - \rho_1}, \quad (2)$$

а открытая пористость

$$\Pi_i^{\text{откр}} = \frac{W_i}{V} \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где  $V$  - объем образца. Неконтролируемой опытным путем величиной является коэффициент извилистости капилляров  $a$ . На основании многочисленных экспериментов на модельных и естественных пористых системах, результатов теоретических расчетов показано [2], что для многих естественных микропористых материалов коэффициент извилистости изменяется в пределах от 1,4 до 1,7. Мы использовали значение  $\pi/2$ . Следует отметить, что вариация численного значения  $a$  может привести к изменению значения радиуса капилляров, но характер распределения пористости по размерам пор останется неизменным.

Для исследований были подготовлены образцы хромовых руд в форме параллелепипедов с высотой  $H$  от 10 до 30 мм. В качестве вытесняемой жидкости использовали этиловый спирт, вытесняющей - воду. Перед пропиткой образцов спиртом их вакуумировали при остаточном давлении не более 10 Па. Измерения изменения массы образцов по мере вытеснения спирта водой проводи-

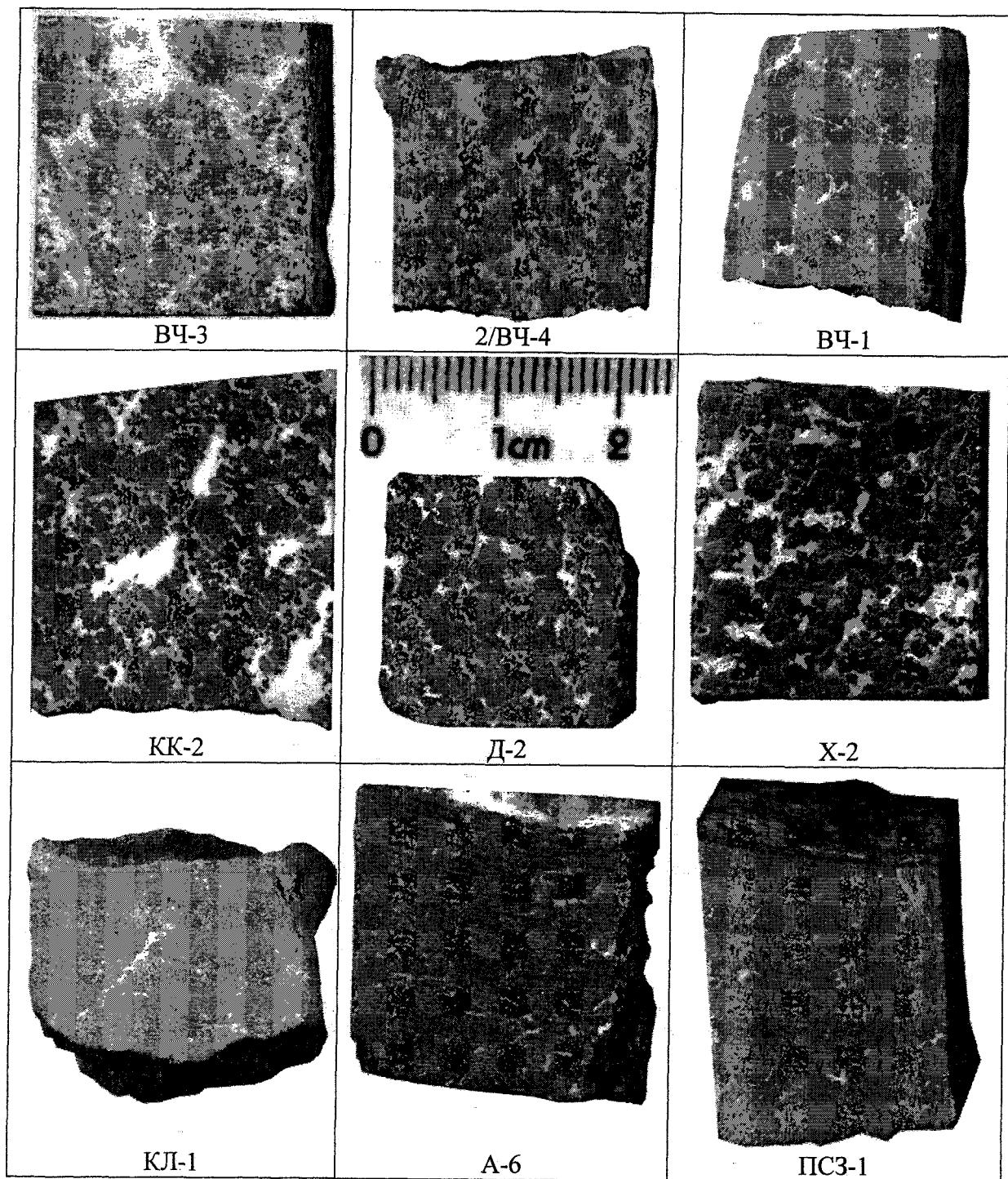


Рис. 1. Макроструктура кусковых образцов хромовых руд (светлое – нерудная составляющая, темное – хромит). Шифр образца, месторождение: ВЧ-3, 2/ВЧ-4, ВЧ-1 – Волчьегогорское, Уфалейский массив; КК-2 – Качкинское, Первомайский массив; Д-2 – Донское, Кемпирсайский массив; X-2 – массив Рай-Из; КЛ-1 – Калкановское, Нуралинский массив; А-6 – Алапаевский массив; ПСЗ-1 – Песчанское Северо-Западное, Уфалейский массив

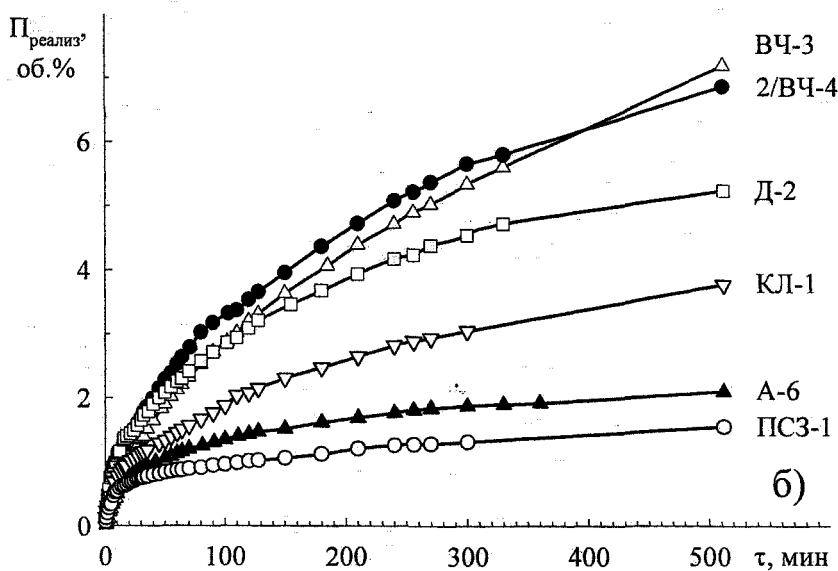
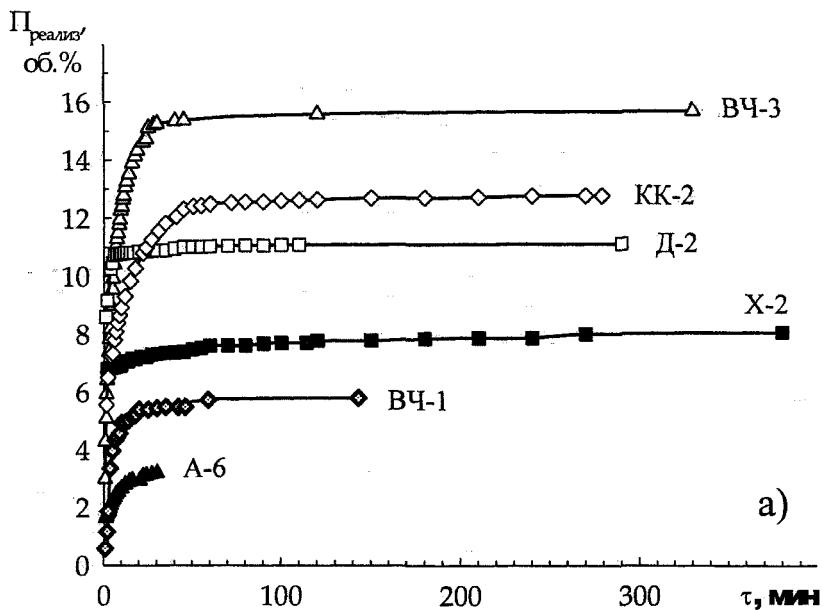


Рис. 2. Кинетика пропитки прокаленных образцов хромовых руд:  
а – вытеснение воздуха водой; б – вытеснение этилового спирта водой

Характеристики пористости образцов хромовых руд

Параметр	Шифр образца					
	ВЧ-3	2/ВЧ-4	Д-2	А-6	КЛ-1	ПСЗ-1
Масса исходного образца $m_{исх}$ , г	27,0531	22,9028	32,6575	41,4168	19,9345	13,5918
Масса образца, прокаленного при 1000 °С, $m^{1000}$ , г	25,2491	21,7553	31,6054	39,9338	19,4634	13,3862
Объем образца $V_{обр}$ , см <sup>3</sup>	8,125	6,704	8,359	10,701	5,044	3,383
Истинная плотность $\rho_{ист}$ , г/см <sup>3</sup>	3,783	3,930	4,301	4,206	4,249	4,313
Кажущаяся плотность $\rho_{каж}$ , г/см <sup>3</sup>	3,11	3,25	3,76	3,73	3,86	4,06
Теоретическая пористость $P_{теор}$ , об. %	22,2	17,6	12,5	14,0	9,3	6,2
Общая пористость $P_{общ}$ , об. %	18,2	17,6	12,1	11,3	9,2	6,1
Закрытая пористость $P_{закр}$ , об. %	1,2	2,7	0,2	5,1	1,5	1,4
Открытая пористость $P_{откр}$ , об. %	17,0	14,9	11,9	6,2	7,7	4,7
Пористость, реализованная за 8000 минут вытеснения спирта водой, $P_{реализ}$ , об. %	16,4	14,9	9,7	5,8	7,6	4,0

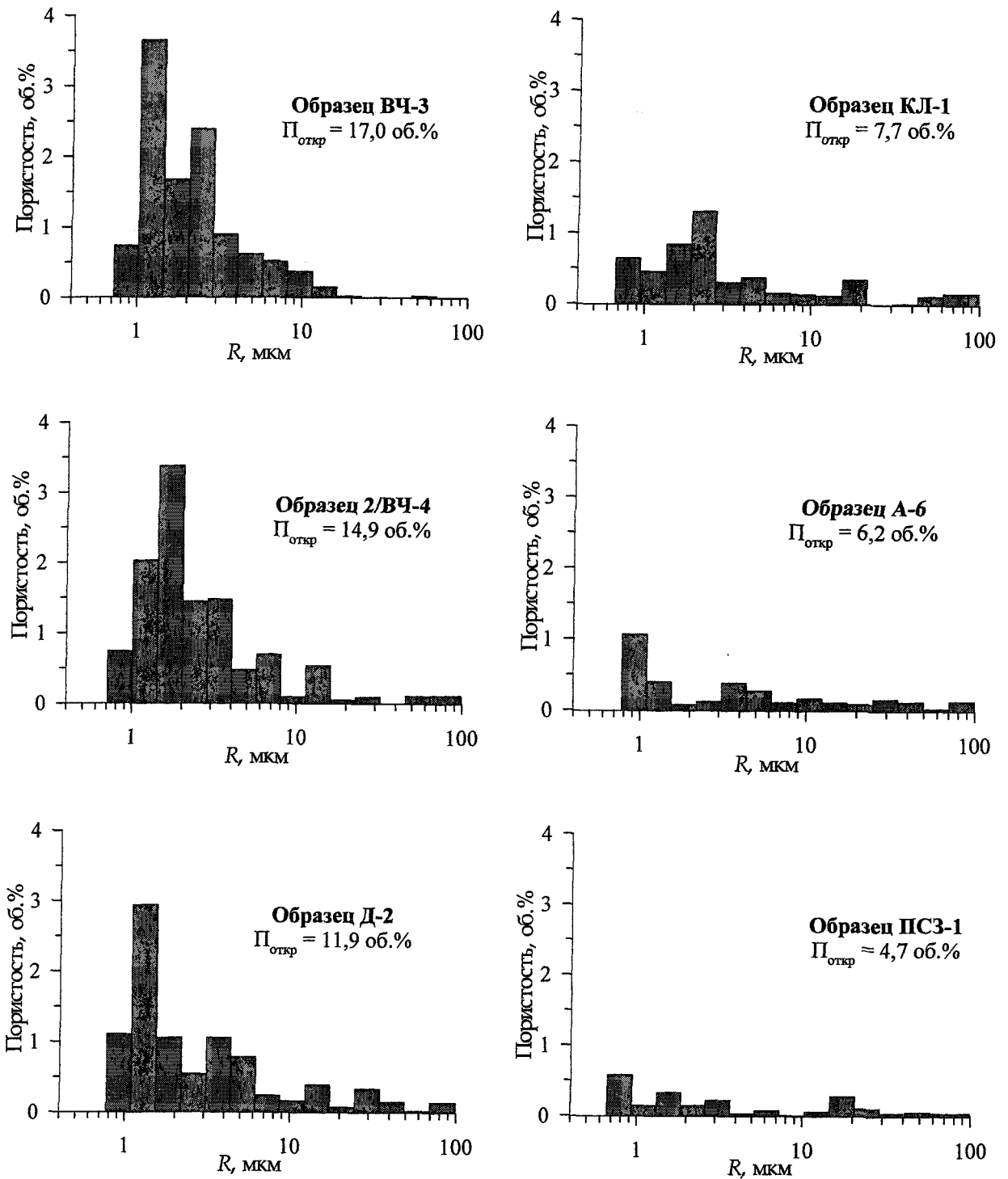


Рис. 3. Распределение открытой пористости образцов по размерам пор (R – «гидравлический» радиус пор)

ли методом непрерывного гидростатического взвешивания в воде предварительно пропитанных спиртом образцов с использованием аналитических весов АДВ-200М.

На рис. 2 приведены данные по кинетике пропитки образцов. Основная доля пор заполняется (см. рис. 2а) в короткий промежуток времени - в первые 10-20 минут, что говорит о доступности

пор для проникновения в них жидкостей, и тем более газов. Результаты, приведенные на рис. 2б, использовались для расчета распределения пористости по размерам пор. Значения общей и реализованной пористости коррелируют с количеством нерудной составляющей - наибольшие значения достигаются в редковкрапленных рудах (таблица, см. рис. 1, 2). Для некоторых образцов (2/ВЧ-4,

КЛ-1, ПСЗ-1) значения теоретической и фактической общей пористости совпадают, для других образцов (ВЧ-3, А-6) фактическая пористость оказывается меньше теоретической, что можно объяснить эффектом «залечивания» микропор, образовавшихся после удаления конституционной воды. Значения реализованной пористости практически совпадают со значениями открытой пористости для образцов 2/ВЧ-4, КЛ-1 и оказываются меньшими для образцов Д-2, А-6, ПСЗ-1. Последний случай может быть объяснен наличием большого количества мелких пор, не успевших пропитаться за время эксперимента.

Распределение пористости по размерам пор (рис. 3) показывает, что основная доля пористости приходится на интервал радиусов пор от 0,7 до

10 мкм. Учитывая, что размер газообразных молекул составляет порядка нанометров, а размер пор в 1000 раз больше, можно утверждать, что такие поры не являются препятствием для проникновения молекул газообразных восстановителей внутрь кусков руды.

#### *Литература*

1. Соляков В.К., Черных В.А. *Определение размеров пор в искусственном графите методом взаимного вытеснения жидкостей*// *Конструкционные материалы на основе графита. Сб. трудов № 2.* - М.: *Металлургия*, 1966. - С. 67-74.

2. *Пористые проницаемые материалы: Справочное издание / Под ред. С.В. Белова.* - М.: *Металлургия*, 1987. - 335 с.