

**Исследование кинетики пропитки для оценки времени технологического процесса выщелачивания базальтовой руды**Игнатюк Р.М.<sup>1</sup>, Калько А.Д.<sup>1</sup>, Машенко В.А.<sup>2</sup><sup>1</sup> Национальный университет водного хозяйства и природопользования (г. Ровно)<sup>2</sup> Ровенский государственный гуманитарный университет

Процесс кучного выщелачивания меди из базальтовой руды предполагает пропитку фракций от 5 до 70 мм реагентом, содержащим 10% раствор серной кислоты. Технологическая эффективность такого процесса будет определяться временем пропитки образцов и скоростью прохождения химических реакций выемки. Из-за сложности комплексного подхода для решения поставленной задачи, условно можно разделить процесс пропитки и выщелачивания, считая, что последний будет начинаться после насыщения некоторого объема образца горной породы. Следовательно, целью данной работы было экспериментальное исследование кинетики пропитки пористых образцов базальтовой руды и оценка времени пропитки на основе капиллярной модели унифицированных пор без учета прохождения химических реакций.

Лабораторные исследования проводились на образцах горной породы, отобранных на базальтовом карьере возле п. Иванчи Волынской области. Химический состав и физические свойства образцов полностью соответствуют параметрам сырья, используемого для извлечения меди методом кучного выщелачивания. Кинетику пропитки образцов исследовали насыщением полностью погруженных образцов в дистиллированную воду и 10% раствор серной кислоты с постоянным измерением изменения их массы. Эффективную пористость  $\varepsilon$  определяли методом водонасыщения согласно [2].

Результаты экспериментальных исследований показали, что эффективная пористость образцов базальтовой руды находится в пределах 4÷8%, при этом отдельные образцы базальтовой руды имели пористость до 15%. Экспериментальные зависимости изменения удельного объема  $\Delta V/m$  пор от времени содержания образцов преобладающей фракции размером 30 мм и пористостью  $\varepsilon = 6\%$  в 10%  $H_2SO_4$  в дистиллированной воде представлены на рис. 1, анализ ко-

торых показывает, что по истечению 4 часов содержания образцов в жидкостях, изменения величины  $\Delta V/m$  не происходит.

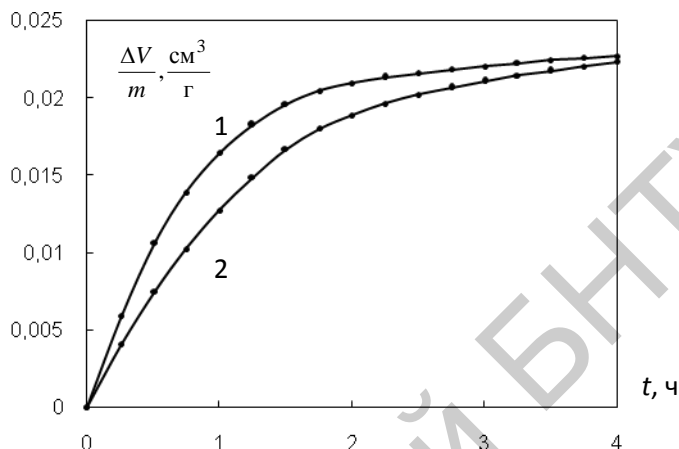


Рис. 1. Зависимости изменения удельного объема  $\Delta V/m$  пор от времени содержания в жидкости: 1—10% серной кислоте; 2—дистиллированной воде.

При этом скорость изменения удельного объема пор в начале эксперимента выше для 10% серной кислоты. Интенсификация скорости пропитки на начальном этапе происходит, очевидно, вследствие вскрытия пор. Химический состав образцов базальтовой руды дает возможность предположить, что вскрытие пор происходит вследствие реакции кислоты с оксидами щелочных ( $Na_2O$ ,  $K_2O$ ) и щелочноземельных ( $MgO$ ,  $CaO$ ) металлов, а также оксидами железа ( $Fe_2O_3$ ,  $FeO$ ) и фосфора ( $P_2O_5$ ), увеличивая тем самым скорость движения фронта пропитки в объеме образца.

Анализ экспериментальных зависимостей изменения величины  $\Delta V/m$  во времени для образцов с различной пористостью (рис. 2) показывает, что с увеличением величины  $\varepsilon$ , время пропитки увеличивается. Так, для образцов руды с  $\varepsilon = 4\%$  время пропитки равно 3 часам и возрастает до 6 часов с пористостью образцов равной 8%. При этом следует отметить, что скорость движения фронта пропитки в образцах с различной пористостью на начальном этапе (до 1 часа) различна и изменяется от 0,0091 до 0,0206 см<sup>3</sup>/(г·ч) с увеличением величины  $\varepsilon$ .

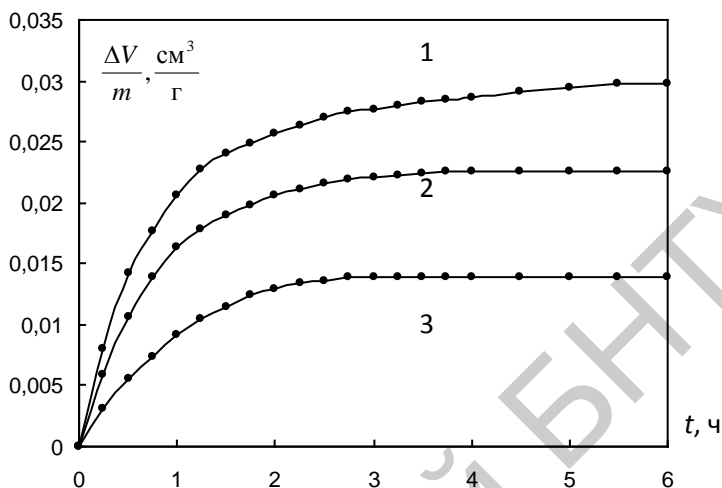


Рис. 2. Зависимости изменения удельного объема  $\Delta V/m$  пор от времени содержания в 10% серной кислоте: 1 –  $\varepsilon=8\%$ ; 2 –  $\varepsilon=6\%$ ; 3 –  $\varepsilon=4\%$ .

Образцы базальтовой руды, как полидисперсной системы, с различной пористостью имеют различные функции распределения пор по радиусам. Проницаемость среды с достаточно широким распределением размеров пор определяется проницаемостью пор радиусом, равным пробойному и их объемной доле. Так для образцов руды с пористостью порядка 8% на начальном этапе пропитки пробойными будут радиусы пор с максимально возможными значениями по размеру. В таком случае процесс пропитки будет проходить достаточно эффективно пока объем пор данных радиусов не будет полностью заполнен. А пропитка пор с радиусами меньше пробойного будет проходить медленно, что и приведет к возрастанию общего времени пропитки образца. Для образцов руды с пористостью порядка 4% распределение пор по радиусам будет более узкое и процесс пропитки будет проходить с квазипостоянной скоростью, но достаточно эффективно во времени с заполнением всего объема пор образца.

Считая в первом приближении частицы базальтовой руды сферическими, рассмотрим задачу пропитки полностью погруженной в

жидкость такой частицы радиусом  $R$ , пренебрегая эффектом зашеленного воздуха. В приближении квазистационарного фронта пропитки для пористой среды согласно капиллярной модели унифицированных пор имеем:

$$4 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot r_f^2 \cdot \frac{dr_f}{dt} = -j(r_f) \quad (1)$$

где  $r_f$  – текущее положение фронта пропитки;  $j(r_f)$  – поток жидкости в частицу, который определяется из решения стационарного уравнения фильтрации:

$$\frac{dj}{dr} = -\frac{d}{dr} \left( \frac{[K]}{\eta} \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \frac{dP}{dr} \right) \quad (2)$$

$$\text{С граничными условиями } P|_{r=R} = P_0, \quad (3)$$

$$P|_{r=r_f} = P_0 + P_K = P_0 - \frac{\sigma_{ж,г} \cdot s \cdot \cos \theta}{\varepsilon}, \quad (4)$$

где  $P$  – давление;  $P_K$  – капиллярное давление;  $P_0$  – атмосферное давление;  $s$  – удельная поверхность в расчете на единицу объема материала;  $\theta$  – контактный угол;  $\sigma_{ж,г}$  – коэффициент поверхностного натяжения на границе фаз жидкость газ;  $\eta$  – вязкость жидкости;  $[K]$  – проницаемость пористой среды.

Решение задачи (1)-(4) дает такие соотношения для потока жидкости [4]:

$$j = \frac{4 \cdot \pi \cdot R \cdot r_f}{R - r_f} \cdot \frac{[K]}{\eta} \cdot \frac{\sigma_{п,г} \cdot s \cdot \cos \theta}{\varepsilon} \quad (5)$$

Соответственно, соотношение между положением фронта пропитки  $r_f$  и временем пропитки  $t$  определяется уравнением:

$$\frac{1}{6} R^3 - \frac{1}{2} R \cdot r_f^2 + \frac{1}{3} r_f^3 = R \frac{[K] \cdot \sigma_{п,г} \cdot s \cdot \cos \theta}{\eta \cdot \varepsilon^2} t \quad (6)$$

Полагая в (6)  $r_f = 0$  и используя соотношение для проницаемости капиллярной модели пористой среды [4]:

$$[K] = \frac{\varepsilon \cdot d^2}{36 \cdot K \cdot (1 - \varepsilon)^2}, \quad (7)$$

где  $d$  – средний размер капилляра;  $K$  – коэффициент, определяемый:  $K = K_0 \cdot \beta^2$ ;  $K_0$  – постоянная в большинстве случаев равная 2;  $\beta$  – извилистость.

Определим характерное время капиллярной пропитки частицы:

$$t_K = \frac{6R^2 \cdot \eta \cdot \beta^2 \cdot \varepsilon \cdot (1 - \varepsilon)^2}{d^2 \cdot \sigma_{p,z} \cdot s \cdot \cos \theta}, \quad (8)$$

Теоретическая оценка времени пропитки для фракции частиц радиуса  $R = 15$  мм с удельной поверхностью  $s \cong 10^5$  м<sup>2</sup>/кг, в зависимости от пористости ( $\varepsilon$  4÷8%) находится в пределах 2,5÷5 часов, что удовлетворительно согласуется с результатами эксперимента. Уменьшение величины фракции базальтовой руды приводит к уменьшению времени пропитки. Для частиц размером 10 мм и пористостью в пределах 4÷8% время пропитки равно соответственно 10÷20 мин.

Таким образом, в работе произведена теоретическая и экспериментальная оценка времени пропитки образцов как основного технологического параметра процесса выщелачивание меди из базальтовой руды.

Литература

1. Аренс В.Ж. Физико-химическая геотехнология / В.Ж. Аренс и др. // Учебник для ВУЗов.- Москва «Горная книга», 2010. – 575 с.
2. ГОСТ 26450.1-85
3. Хейфец Л.И., Неймарк А.В. Многофазные процессы в пористых средах. – М.: Химия, 1982. – 320 с.
4. Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным и зернистым слоем. – Л.: Химия, 1979. – 176 с.