

УДК 622'17

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛАЖНОСТИ МАССИВА ПРИ КАПИЛЛЯРНОМ ДВИЖЕНИИ РАСТВОРОВ**Харитонов М.Ю., Михайлов А.Г., Вашлаев И.И.***Институт химии и химической технологии СО РАН, Красноярск, e-mail: chem@icct.ru*

В статье приведены результаты лабораторного эксперимента и теоретических расчетов по изменению влажности массива пород. В качестве объекта исследований использованы лежалые хвосты обогащения сульфидных медно-никелевых руд Норильского комбината, складированные в долине реки Щучья. Установлена возможность повышения насыщенности породы раствором до требуемой влажности путем чередования горизонтальных слоев с различными капиллярными свойствами. Используя горизонтальные слои с меньшими значениями крупности материалов, не прикладывая дополнительного внешнего давления, можно поднять раствор к поверхности породы и получить необходимую влажность на поверхности. Экспериментально доказана возможность извлечения раствора с поверхности породы с использованием гигроскопического материала, размещенного на поверхности. Представлена математическая модель процесса инфильтрационного увлажнения техногенного массива, сложенного горизонтальными слоями различной крупности. С использованием разработанного алгоритма проведены расчеты влажности породы, сложенной слоями различной толщины и крупности.

Ключевые слова: хвосты обогащения, влажность, капиллярное поднятие**MATHEMATICAL MODELLING OF HUMIDITY OF MASSIF AT CAPILLARY MOVEMENT OF SOLUTIONS****Kharitonova M.Y., Mikhailov A.G., Vashlaev I.I.***Institute of Chemistry and Chemical Technology of SB RAS, Krasnoyarsk, e-mail: chem@icct.ru*

The results of laboratory experiment and theoretical calculations on change of humidity of massif are presented in paper. Object of researches are old mill tailings of sulfide copper-nickel ores of the Norilsk industrial complex, storage in the river valley Schuchya. Possibility of increase of a saturation of massif by a solution to demanded humidity by alternation of horizontal layers with various capillary properties is established. Using horizontal layers with smaller particle size, without making additional external pressure, it is possible to raise a solution to a surface of material and to receive necessary humidity on a surface. Possibility of extraction of solution from a surface of rock massif with use of the hygroscopic material placed on a surface is experimentally proved. The mathematical model of process infiltrative humidifying of rock combined by horizontal layers with various particles size is presented. With use of the developed algorithm the calculations of humidity of the rock massif made by layers of a various particle size are carried out.

Keywords: old mill tailings, humidity, capillary rise

Практически во всех хвостах переработки и отвалах некондиционных руд происходят инфильтрационные геологические процессы, вызванные тем, что минеральные отходы подвергаются воздействию атмосферных осадков, нижние слои – воздействию грунтовых вод. В результате почти постоянного притока воды происходит трансформация отходов, растворимые вещества вовлекаются в водную миграцию. Далее может происходить концентрирование растворенных веществ на геохимических барьерах или, наоборот, рассеяние далеко за границами хвостохранилищ. Движение минерализованных растворов в хвостохранилищах осуществляется в условиях двух видов: при полном водонасыщении массива или при неполном водонасыщении в зоне капиллярной каймы. В последнее время вопросы фильтрации водных растворов через отвалы и изменения минералов, происходящие при этом, являются объектом изучения многих исследователей [1, 3, 4 и др.]. Что касается вагопереноса в условиях неполного насыщения в хвостохранилище, то этот вопрос изучен недостаточно,

хотя имеет первостепенное значение для изучения ряда важных практических проблем. Среди них направленный перенос растворов в техногенных рыхлых массивах; управление уровнем насыщенности массива раствором с использованием инфильтрационных процессов; создание условий для концентрирования компонентов в отвалах; изучение режима влажности массива в связи с решением различных задач обоснования параметров технологии инфильтрационного извлечения полезных компонентов из техногенных объектов (имеется в виду подпитывание процессов направленного движения растворов по капиллярам массива потенциальными ресурсами недр).

Для изучения случая движения растворов в зоне капиллярной каймы проведено математическое моделирование процесса инфильтрационного увлажнения техногенного массива раствором. Эта часть исследований необходима для того, чтобы определить граничные значения уровня подземных вод, при котором может существовать движение растворов и перенос элементов в массиве.

Математическая модель, алгоритм

Исследуемая порода представляет собой материал с совокупностью контактирующих между собой пор различных размеров. Это материал со сложной структурой, и детальное описание его затруднено. Для характеристики реального материала, который мог бы быть описан математически, была применена несколько упрощенная модель, не меняющая основные свойства массива. Структура исследуемого массива представляет собой прямые цилиндрические капилляры, размер которых характеризуется некоторым средним значением R_k , а промежутки между ними заполнены твердой фазой из сферических частиц с эффективным диаметром $D_э$. При изучении породы, сложенной двумя горизонтальными слоями, рассматривали модель, представляющую собой систему контактирующих между собой капилляров различных радиусов R_{k1} и R_{k2} .

Для такой модели правильной упаковки сферических частиц одинакового радиуса получены значения эффективного диаметра частицы $D_э = 0,0634$ мм, радиуса капилляров $R_k = 0,006$ мм. Эти величины приближенно отражают реальную структуру исследуемого материала и использованы в дальнейших расчетах.

Рассмотрим массив, сложенный горизонтальными слоями с разным размером частиц и капилляров. Нижний слой массива контактирует с горизонтом раствора, соответствующим горизонту подземных вод. До уровня дневной поверхности слой массива имеет разные степени влажности. Эта зона массива между горизонтом подземных вод и дневной поверхностью представляет интерес в оценке возможности движения растворов. Такая оценка может быть представлена характеристикой степени влажности. Для разных значений диаметров капилляров и крупности частиц значения влажности будут разными. Кроме того, материал разной крупности может быть уложен слоями, как горизонтальными, так и наклонными. Задачу оценки влажности породы, сложенной горизонтальными слоями с разными капиллярными свойствами, представили следующим образом. Предположим, для слоя массива 1, характеризующегося набором основных параметров (размер пор, диаметр зерен, пористость, высота капиллярного поднятия – R_{k1} , $D_{э1}$, m_1 , h_{k1}), известно распределение влажности $W_1(X)$ в зоне капиллярной каймы на высоте X от уровня гравитационной зоны. Для слоя 2, характеризующегося набором параметров (R_{k2} , $D_{э2}$, m_2 , h_{k2}), известно распределение влажности $W_2(X)$ в зоне капиллярной каймы на высоте X от уровня гравитационной зоны. Слои массива уложены горизонтально, толщина слоев A_1 и A_2 . Требуется определить влажность слоя 2 на высоте $X = (A_1 + A_2)$ при различных значениях A_1 и A_2 . При такой постановке задачи необходимо оценить возможность поднятия раствора в слое 1 до границы раздела двух слоев, возможность его капиллярного поднятия во втором слое, возможность поднятия раствора до свободной поверхности и значение влажности на поверхности породы.

Построение решения основывалось на следующих положениях, сформированных известными учеными. Распределение влажности в капиллярной кайме на высоте X от гравитационной зоны может быть определено по эмпирической формуле С.Ф. Аверьянова [2]:

$$w(x) = m \sqrt{1 - \left[1 - \left(\frac{w_0}{m} \right)^2 \right] \frac{x}{h_k}},$$

где m – пористость; w_0 – наименьшая влагоемкость; h_k – максимальная высота капиллярного поднятия, ось X направлена по вертикали вверх.

Вода в вертикальном капилляре поднимается под действием капиллярных сил, вызванных силами поверхностного натяжения на границе контакта породы и воды (уравнение Жюрена). Отсюда величина капиллярного давления (Δp_k):

$$\Delta p_k = \frac{2\sigma \cos \theta}{R_k}, \quad (1)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения.

Жидкость будет всасываться в капилляр до тех пор, пока капиллярное давление не уравновесится обратным воздействием гидростатического давления (p_r) столба жидкости высотой h (уравнение Лапласа):

$$p_r = \rho_w q h,$$

где ρ_w – плотность воды; q – ускорение свободного падения.

Вышеупомянутые уравнения предполагают, что капилляры имеют круглое поперечное сечение. Для капилляров нецилиндрической формы:

$$\Delta p_k = a \frac{\sigma}{R_k}. \quad (2)$$

Однако, как показали Wong и др. [5,6], для капилляров различных форм поперечного сечения численное значение величины a зависит от угла контакта жидкости с капиллярной стенкой и ограничено уравнениями (1) и (2).

Исходя из этих основных положений, возможно построение следующего алгоритма определения влажности массива, представленного двумя слоями с различными характеристиками пористости (рис. 1). Разработанная модель учитывает изменение влажности породы, вызванное расположением сверху слоя с другими капиллярными свойствами, и может использоваться для любого количества слоев.

Результаты исследования и их обсуждение

С использованием предложенного алгоритма (рис. 1) проведены расчеты влажности породы, сложенной слоями различной толщины и крупности. Расчеты проводились для реального материала – хвостов обогащения сульфидных медно-никелевых руд, складированных в долине р. Щучья, которые являются отходами горно-металлургического комбината Норильского промрайона. Установлена возможность повышения влажности породы, если она искусственно отсортирована на слои с различным гранулометрическим составом и слои уложены от самого крупного класса крупности к самому мелкому классу. При такой упорядоченной укладке слоев при одинаковой толщине фильтрующего слоя 84 см влажность на поверхности возрастает с 32,5% до 33,8% (рис. 2). Увеличение на первый взгляд незначительное, но при увеличении толщины фильтрующего слоя можно добиться более существенного возрастания влажности. Так, например

для исследуемого материала с крупностью частиц $D_3 = 0,063$ мм и толщине слоя 3 м выщелачивающий раствор под действием капиллярных сил не поднимется до поверхности. Влажность породы порядка 7% будет находиться на высоте примерно

2,5 м от уровня грунтовых вод. Если расположить 2 м исследуемого материала и на него сверху 1 м породы, состоящей из более мелких частиц ($D_3 = 0,059$ мм), то при общей толщине слоя 3 м влажность на поверхности составит 7%.

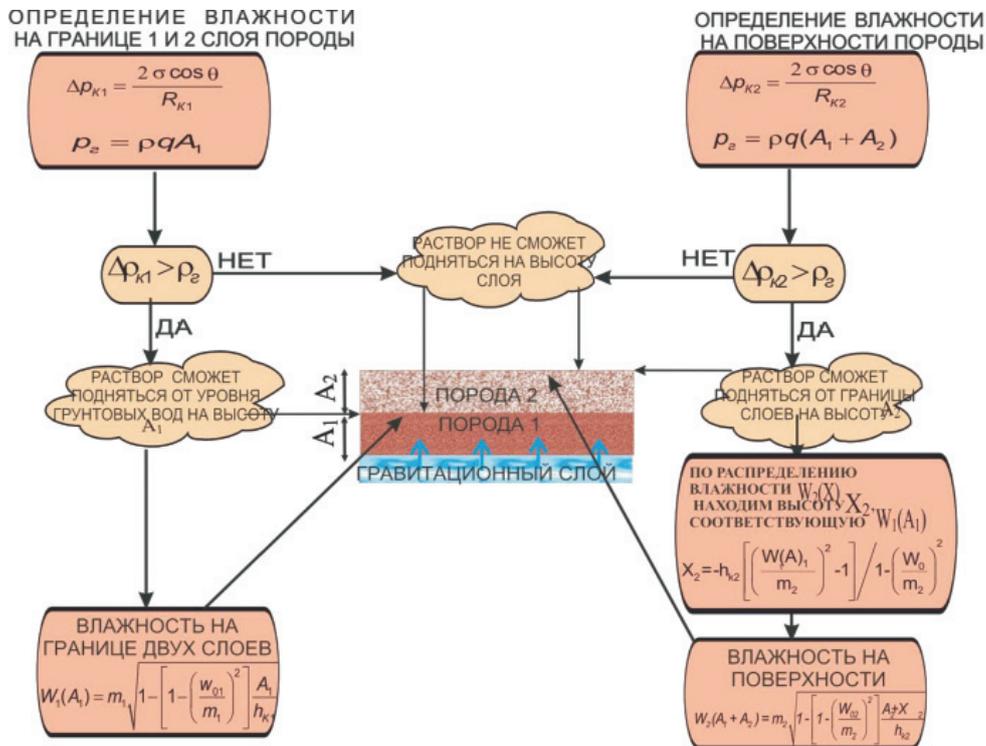


Рис. 1. Алгоритм определения влажности на поверхности породы, сложенной двумя горизонтальными слоями с разными свойствами капиллярности

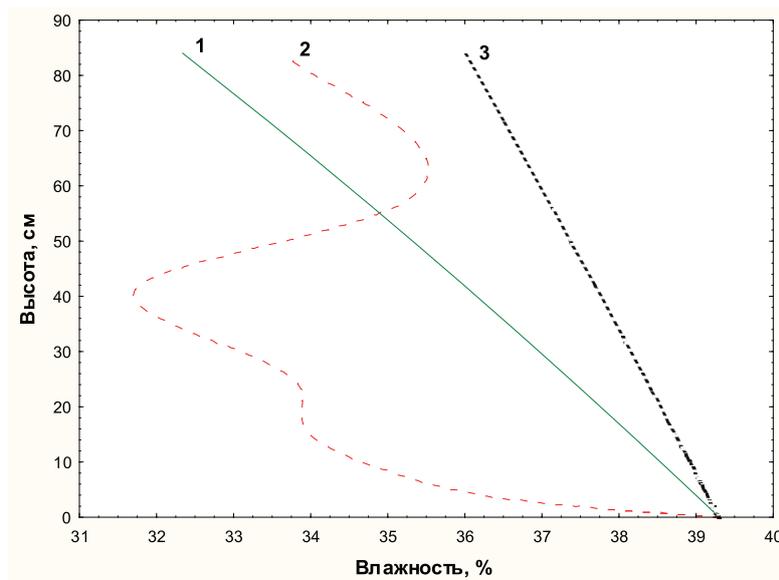


Рис. 2. Влажность в зависимости от высоты относительно гравитационной зоны для пород различной крупности:

1 – слой с эффективным диаметром частиц $d_3 = 0,063$ мм; 2 – упорядоченное расположение слоев от $d_3 = 1,5$ мм до $d_3 = 0,03$ мм; 3 – слой с эффективным диаметром частиц $d_3 = 0,03$ мм

С использованием только капиллярных свойств породы в приведенном примере раствор поднимается на 0,5 м. При увеличении толщины мелкого слоя до 2 м и снижении толщины крупного слоя до 1 м влажность на поверхности составит уже 18%. Таким образом, установлено, что, используя горизонтальные слои с меньшими значениями крупности материалов, не прикладывая дополнительного внешнего давления, можно поднять раствор к поверхности породы и получить необходимую влажность на поверхности.

Результаты теоретических расчетов были проверены на лабораторном эксперименте. Отходы обогащения руд объемом 5500 см³ помещались в цилиндрическую колонку диаметром 10 см и высотой 100 см. Снизу в колонку подавался раствор. На поверхности породы разместили слой гигроскопического материала толщиной 3, со средним радиусом капилляров 0,003 мм, образно говоря, «насос». Применяя такой «насос», в лабораторном эксперименте удалось получить более высокую влажность исследуемой породы при одной и той же высоте всасывания. В условиях проводимого эксперимента гигроскопический верхний слой удерживал до 180 г раствора.

Выводы

Подтверждено предположение о том, что размещение на поверхности породы слоя материала с малыми размерами капилляров позволит повысить влажность на поверхности. На основании обобщения результатов лабораторных экспериментов и теоретических расчетов установлена возможность изменения влажности в массиве горных пород посредством варьирования капиллярными свойствами слоев с минимальными энергетическими и материальными затратами. Обоснованы оптимальные способы поднятия раствора к поверхности и установлена возможность использования гигроскопического материала для извлечения раствора на дневной поверхности. Проведенные исследования могут служить основой для вариантов технологических решений.

Список литературы

1. Зосин А.П., Приймак Т.И., Кошкина Л.Б. Экологические аспекты процессов геохимической трансформации минеральных отходов от переработки сульфидных медно-никелевых руд // Экологическая химия. – 2003. – № 12(1). – С. 33–40.
2. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. – М.: Наука, 1977. – 664 с.
3. Чантурия В.А., Макаров Д.В., Макаров В.Н., Васильева Т.Н. Окисление нерудных и сульфидных минералов в модельных экспериментах и в реальных хвостохранилищах // Горный журнал. – 2000. – № 4. – С. 55–58.
4. Чантурия В.А., Макаров Д.В., Макаров В.Н. Изменение нерудных минералов горнопромышленных отходов в процессе хранения под воздействием минеральных кислот // Инженерная экология. – 2000. – № 1. – С. 31–39.
5. Wong H., Morris S., Radke C.J. Three dimensional menisci in polygonal capillaries // J. Colloid Interf. Sci. – 1992. – № 148 (2). – P. 317–336.
6. Wong H., Morris S., Radke C.J. Two dimensional menisci in nonaxisymmetric capillaries // J. Colloid Interf. Sci. – 1992. – № 148 (1). – P. 284–287.

References

1. Zosin A.P., Prijmak T.I., Koshkina L.B. Jekologicheskie aspekty processov geohimicheskoj transformacii mineral'nyh othodov ot pererabtki sul'fidnyh medno-nikelevykh rud // Jekologicheskaja himija. 2003. 12(1). pp. 33–40.
2. Polubarinova-Kochina P.Ja. Teorija dvizhenija grunтовых вод. M: Nauka, 1977. 664 p.
3. Chanturija V.A., Makarov D.V., Makarov V.N., Vasil'eva T.N. Okislenie nerudnyh i sul'fidnyh mineralov v model'nyh jeksperimentah i v real'nyh hvostohranilishhah // Gornyj zhurnal. 2000. no. 4. pp. 55–58.
4. Chanturija V.A., Makarov D.V., Makarov V.N. Izmenenie nerudnyh mineralov gornopromyshlennyh othodov v processe hranenija pod vozdejstviem mineral'nyh kislot // Inzhenernaja jekologija. 2000. no. 1. pp. 31–39.
5. Wong H., Morris S., Radke C.J. Three dimensional menisci in polygonal capillaries. J. Colloid Interf. Sci. 148 (2). 1992. 317–336.
6. Wong H., Morris S., Radke C.J. Two dimensional menisci in nonaxisymmetric capillaries. J. Colloid Interf. Sci. 148 (1). 1992. 284–287.

Рецензенты:

Гилев А.В., д.т.н., профессор кафедры горных машин и комплексов, ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск;

Брагин В.И., д.т.н., профессор кафедры обогащения полезных ископаемых, ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск.

Работа поступила в редакцию 11.04.2013.