

А.К.Турсунбаева

Карагандинский государственный технический университет

**УПЛОТНЕНИЕ ЧАСТИЦ ПРИ КУЧНОМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИИ**

*Өлшемі бірдей сфералық бөліктерден тұратын қатты денелердің кеуектігін қарастыру нәтижелері берілген. Тығыздалған бөлшектерді ұсақ фракциямен толтыру сұрақтары талқыланған. Бірнеше тығыздалу әдістері келтірілген. Металдардың үйінді сілтілеу кезінде пайда болатын модель шын жағдаймен салыстырылды. Әр шикізат үшін технологиялық көрсеткіштер зерттелді.*

*The brought results of consideration to porosity hard body, consisting of one size of the spherical particles. They are discussed questions of the filling the times small faction compacting particles. Article shows several ways to seal. The model is compared with the real situation arising at compact leaching of metals. For each material studied technological characteristics.*

*Введение*

Успешное применение кучного выщелачивания предполагает высокую проницаемость руд после того, как они будут подвергнуты дроблению или другим видам обработки и сложены в штабель; при этом естественно ставится цель: обеспечить равномерное распределение цианидного выщелачивающего раствора при его просачивании через штабель.

Золото-серебряные руды отличаются чрезмерно высоким содержанием глинистой составляющей или тонких фракций, образовавшихся во время дробления. Для этого типа руд очень трудно обеспечить высокие показатели кучного выщелачивания. Наличие в исходном материале чрезмерного количества тонкого шлама (обычно это фракция 50 микрон или с размером частиц менее 270 меш на сите Тайлера) замедляет просачивание через штабель выщелачивающего раствора, вызывает каналобразование либо приводит к формированию внутри штабеля нетронутых или невыщелоченных зон. Это может приводить к неоправданному замедлению выщелачивания и существенному снижению извлекаемости металлов. Даже может дойти до того, что глины и шламы полностью «запечатывают» штабель, и раствор будет стекать по краям рудной кучи, не проникая в ее глубину [1].

Проблема кучного выщелачивания руд, содержащих тонкую фракцию, может быть еще более осложнена при формировании и подготовке штабеля к обработке, поскольку во время этих операций может происходить естественная сортировка, разделение грубого и более мелко измельченного материала. Это явление приводит к концентрации тонкой фракции в центральной части отдельных рудных куч (загрузок) и одновременной концентрации более крупных рудных обломков в нижней прибортовой части и в основании куч.

В настоящей работе мы рассмотрим физические основы уплотнения частиц и применимость полученных результатов к кучному выщелачиванию металлов.

*Уплотнение твердых частиц*

Уплотнение (прессование) частиц можно определить как выбор размеров пор, их формы и пропорций в зернистом материале, который бы обеспечивал получение системы с нужной пористостью.

Пористость  $\bar{\epsilon}$  слоя равна доли от общего пространства, выраженной в процентах, которая не занята зернистым материалом.

Объемная (или кажущаяся) плотность равна массе частиц в единице объема слоя. Кажущийся объем  $V_a$  равен объему слоя, занятому единичным истинным объемом частиц. Коэффициент уплотнения равен части (доли) полного объема слоя  $V_e$ , занятой зернистым материалом  $V_p$ , т.е. равен отношению  $V_p/V_e$ . Коэффициент пористости (или относительная пористость) равен  $1 - V_p/V_e$ .

Эффективность уплотнения  $P\bar{\epsilon}$  равна доле имеющегося объема с порами (скажем, слоя, образованного грубыми частицами), которая занята поступающим твердым материалом (обычно более мелкими фракциями). Она совпадает с коэффициентом уплотнения  $P_f$ , когда имеющийся объем равен объему контейнера, а твердый материал является первой компонентой.

Поры в теле могут быть различных типов. Обычно называют шесть типов пор: (1) закрытые, или герметичные, поры, (2) каналные поры, соединяющие отдельные поры, (3) тупиковые поры, (4) петлевые поры, (5) ячеистые поры и (6) микропоры. Помимо перечисленных, могут существовать и другие виды пор, которые непрерывно проходят от одной поверхности тела к другой, возможно, по извилистому пути.

В зависимости от метода определения, основанного на поглощении соответствующей жидкости, все поры были разделены на два типа: (а) закрытые и (б) открытые. Количество жидкости, поглощенное в данном объеме, будет соответствовать открытой пористости, которую принято называть «кажущейся пористостью».

Разность между «истинной пористостью» (которую рассчитывают по плотности материала) и «кажущейся пористостью» называют «скрытой пористостью».

Теоретически, в слое, состоящем из однородных сферических частиц, средний размер поры будет равен размеру пустого пространства, образованного при однослойном шахматном расположении трех сфер. Радиус поры

$$r = 0,154R, \quad (1)$$

где  $r$  — радиус поры;  $R$  — радиус частицы.

Распределение частиц по размерам определяют с помощью микроскопа, ртутными порозиметрами и газоабсорбционными методами.

Теоретическое уплотнение сферических частиц можно установить исходя из тех же геометрических соображений, которые используются для определения упаковки ионов в кристаллической решетке [2, 3].

Сферические частицы одинакового размера могут упаковываться в пяти различных модификациях: (1) кубической, (2) одиночной шахматной, (3) двойной шахматной, (4) пирамидальной и (5) тетраэдрической. Упаковка сферических однородных частиц не зависит от их диаметров.

(1) Кубическая упаковка (рис. 1а). Каждая сфера соприкасается с четырьмя другими сферами в одном слое. Все слои идентичны. Самая высокая точка сферы нижнего слоя контактирует с самой нижней точкой верхнего слоя. Пусть в одном слое  $n$  сфер расположено вдоль оси  $x$  и  $n$  сфер вдоль оси  $y$ . Таким образом, площадь поверхности одного слоя будет равна  $(nd)^2$  единицам, где  $d$  — диаметр сферы;  $n$  таких слоев накладываются друг на друга, удовлетворяя условию кубической упаковки. Теоретический объем пор при кубической упаковке составляет 47,64 %.

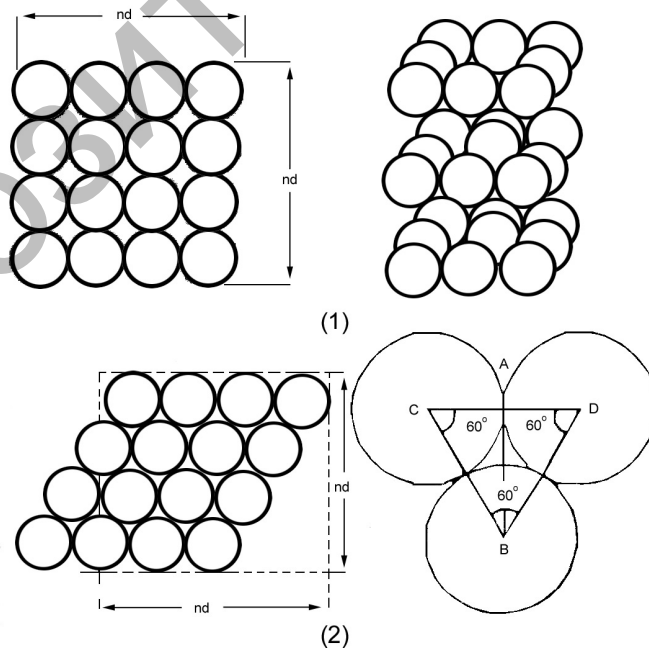


Рис. 1. Упаковка сферических частиц: 1 — кубическая; 2 — одиночная шахматная

(2) Одиночная шахматная упаковка (рис. 1б). Каждая сфера соприкасается с шестью сферами в одном и том же слое. Межцентровое расстояние двух последовательных сфер, расположенных на

оси  $y$ , равно  $(\sqrt{3}d/2)$ . Следовательно, число сфер, которое может уложиться вдоль оси  $y$ , будет равно  $(2n/\sqrt{3})$ . Число сфер вдоль оси  $x$  останется тем же, т.е. равным  $n$ .

Образующиеся таким образом  $n$  слоев накладываются друг на друга точно так же, как при кубической упаковке, что приводит к одиночной шахматной упаковке. Объем пор в этом случае равен 39,55 %.

(3) Двойная шахматная упаковка (рис. 2). При такой упаковке каждая сфера соприкасается с шестью сферами в данном слое, но сфера в верхнем слое располагается в углублении между двумя соседними сферами в нижнем слое.

Здесь число сфер вдоль оси  $x$  равно  $n$ , однако число сфер вдоль каждой из осей  $y$  и  $z$  равно  $(2n/\sqrt{3})$ . Объем пор равен 30,16 %.

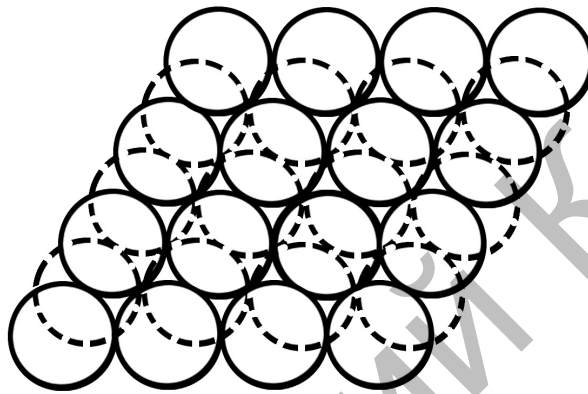


Рис. 2. Двойная шахматная упаковка сферических частиц

(4) Пирамидальная и (5) тетраэдрическая упаковки (рис. 3). Здесь образуются слои из плотноупакованных сфер, т.е. слои, в которых каждая сфера соприкасается с шестью другими сферами в данном слое. Обозначим последовательные слои буквами А, В, С и т.д.

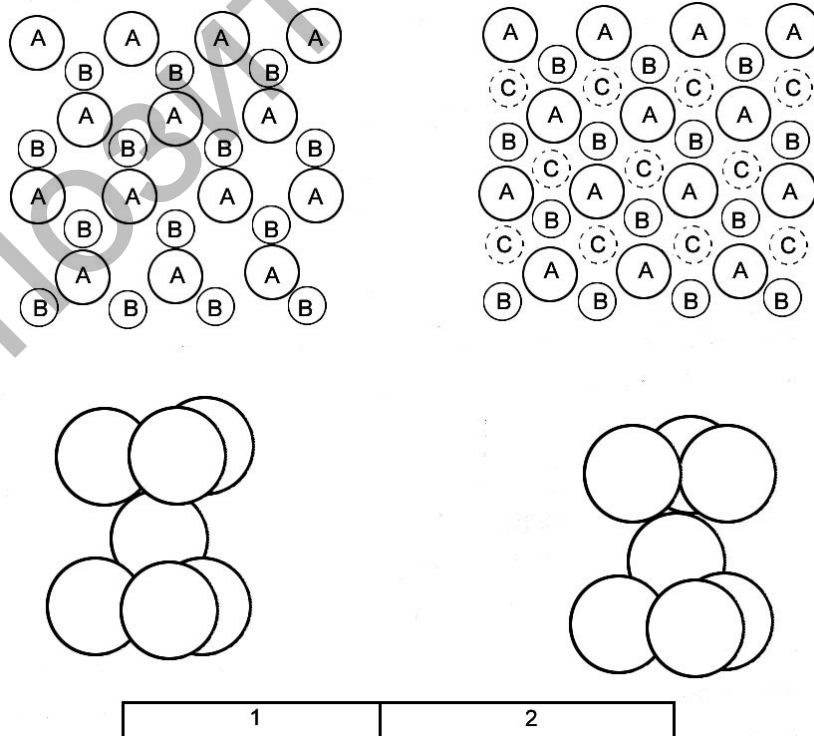


Рис. 3. Плотная упаковка сферических частиц: 1 — гексагональная плотная упаковка; 2 — кубическая плотная упаковка

Второй слой (В) из плотно упакованных сфер может располагаться на первом слое (А) таким образом, что каждая сфера слоя (В) будет лежать в углублении между тремя соседними сферами нижнего слоя (А). Тогда третий слой (С), схожий во всех отношениях с первыми двумя слоями, может располагаться на втором слое так, что каждая сфера слоя (С) будет лежать в углублении между тремя соседними сферами слоя (В). Этого можно достичь двумя путями:

– (а) слой (С) может формироваться непосредственно на слое (А) так, что каждый третий слой структуры будет идентичен первому. Последовательность АВАВАВ... и т.д. полностью характеризует структуру, в которой А указывает расположение сфер в одном слое, а В — расположение сфер в слое непосредственно над ним. Такая упаковка называется «тетраэдрической, или гексагональной плотной, упаковкой»;

– (б) слой (С) может располагаться в совершенно новом положении, так что слои А, В и С уже не схожи друг с другом. Это дает последовательность АВС, АВС, АВС... и т.д. Такой порядок приводит к образованию пирамиды, и упаковка называется «пирамидальной, или кубической плотной, упаковкой».

В обеих плотноупакованных структурах каждая сфера контактирует с двенадцатью другими сферами, шесть из которых находится в одной плоскости, и по три — в соседних слоях сверху и снизу. Они отличаются только расположением сфер в этих соседних слоях. Объем пор в этих структурах равен 25,95 %. Данные для пяти видов упаковки одноразмерных сферических частиц приведены в таблице. Следует упомянуть, что, независимо от вида упаковки, суммарная пористость не зависит от диаметра частиц.

Т а б л и ц а

Систематическая упаковка одноразмерных сферических частиц

№ п/п	Вид упаковки	Объем пор	Координационное число
1	Кубическая	47,64	6
2	Одиночная шахматная	39,55	8
3	Двойная шахматная	30,16	10
4	Пирамидальная	25,95	12
5	Тетраэдрическая	25,95	12

Из таблицы видно, что у сферических одноразмерных частиц пористость и координационное число тесно взаимосвязаны. Как следует из таблицы, эта взаимосвязь действительно существует только при упорядоченной упаковке. Имеется возможность достижения некоторого промежуточного значения пористости между любыми двумя ближайшими видами упаковки путем правильного расположения частиц без изменения координационного числа. Например, когда координационное число равно шести (как в случае упорядоченной кубической упаковки), пористость слоя может варьировать от 47,6 до 39,5 %. Таким образом, корреляция между координационным числом и пористостью оказывается не столь жесткой, как это обычно принято считать. К такому же выводу пришли и другие авторы, которые показали наличие локальных изменений суммарной пористости в пределах одного слоя.

Выше было показано, что упаковка (уплотнение) одноразмерных сферических частиц не позволяет получить совершенно беспористый слой, минимальная пористость в такой системе, обусловленная упаковкой, может быть не ниже примерно 26 %. Чтобы обеспечить дальнейшее уменьшение пористости, в матрицу из грубых частиц нужно ввести более мелкие частицы определенных размеров. Введение таких мелких частиц в объем пор грубых частиц может осуществляться двумя способами, которые схематически иллюстрируются рисунком 4.

Согласно первому варианту упаковки (рис. 4) пустоты между первичными частицами заполняются вторичными частицами, размер которых равен размеру этих пустот, так что меньшие вторичные частицы соприкасаются со всеми окружающими их первичными частицами. Объемы пор, остающиеся после введения вторичных частиц, заполняются еще меньшими третичными частицами этим же методом и т.д., вплоть до практически полного заполнения всех пор. Такой способ заполнения пор вплоть до пятеричных частиц дает остаточную пористость уплотненного слоя, примерно равную 14,9 %. Однако подобный способ уплотнения частиц редко применяется на практике, возможно, вследствие пассивности частиц меньшего размера при заполнении ими пор в жесткой структуре слоя.

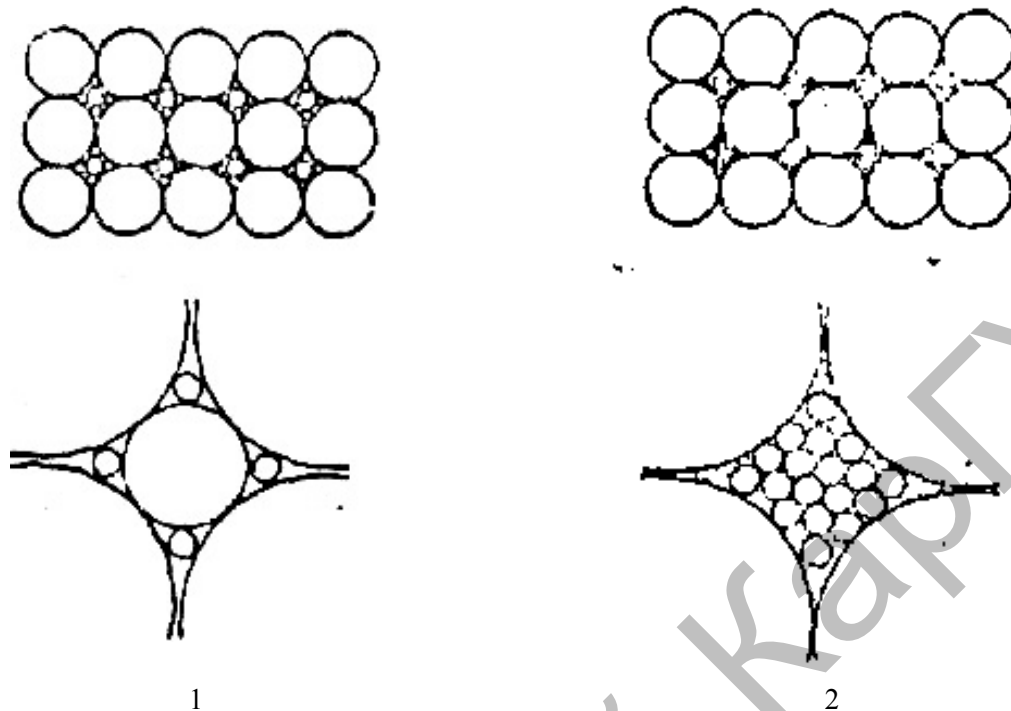


Рис. 4. Многокомпонентная упаковка сферических частиц различных размеров: 1 — теоретическое представление; 2 — практическая реализация

Второй способ уплотнения, основанный на использовании двух частиц со сравнительно большим отношением диаметров, очевидно, легче реализуется в практических ситуациях, так как мелкая фракция свободно проходит через сетку из грубых частиц. Из рисунка 4 видно, что вторичные частицы могут свободно заполнять все пустоты благодаря тому, что они уплотняются точно так же, как и первичные частицы. Другими словами, объем пор первичных частиц будет заполняться вторичными частицами с остаточной пористостью, приблизительно равной 26 %. Этот вид уплотнения известен как «заполнение зазоров», или «прерывистое заполнение». Поэтому, теоретически, оптимальное количество второй компоненты с очень большим отношением диаметров может уменьшить пористость получающегося уплотненного слоя от 26 до  $26 \cdot 0,26 = 6,76$  %.

#### *Окомковывание руд при кучном выщелачивании*

На рисунке 4 показана реальная ситуация, возникающая в штабелях руд, подготовленных для кучного выщелачивания.

Когда отдельные загрузочные кучи внутри штабеля подвергаются выравниванию перед установкой разбрызгивающей раствор системы, происходит дальнейшее разделение материала, поскольку тонкая фракция избирательно просыпается вниз. Результатом такого рода сегрегации материала является появление отдельных участков или зон с различной проницаемостью. Вследствие этого выщелачивающие растворы начинают просачиваться вниз преимущественно через участки, сложенные грубозернистым материалом, минуя, либо лишь слегка увлажняя участки, сложенные тонкой фракцией или шламами. Эффективное использование кучного выщелачивания при освоении ресурсов низкосортных золото-серебряных руд, находящихся на грани кондиционности, потребовало внедрения новых методов, способных обеспечить более равномерное распределение рудного материала по крупности в пределах штабеля при его формировании и более надежный контроль за поведением шламов во время выщелачивания.

Предварительное окомкование руд доказало свою эффективность при переработке кучным выщелачиванием низкосортного материала с низкими фильтрационными свойствами. В некоторых случаях схема «окомкование–кучное выщелачивание» представляет собой единственное разумное решение проблемы исходного сырья для переработки. В то же время дробильные комплексы и агломерационные системы достаточно капиталоемки, поэтому они не должны включаться в схему промышленной переработки, если это не является абсолютно необходимым [1].

---

---

*Заключение*

Из приведенного анализа физических основ уплотнения следует, что прежде чем запускать агломерационное производство в коммерческих масштабах, самым внимательным образом должны быть изучены технологические параметры окомкования для каждого конкретного вида сырья.

Список литературы

1. Кучное выщелачивание золота. Зарубежный опыт и перспективы развития: Справоч. / Под ред. В.В.Караганова и Б.С.Ужкенова. — Алматы, 2002. — 260 с.
2. Шаскольская М.П. Кристаллография. — М.: Высш. шк., 1974. — 268 с.
3. Васильев А.Н. Физическая кристаллография. — М.: Высш. шк., 1978. — 196 с.

Репозиторий КАРГУ