

УДК 622.7

**ВЛИЯНИЕ КРУПНОСТИ ГАЛЕНИТА И КОНЦЕНТРАЦИИ СОБИРАТЕЛЯ
НА ФЛОТАЦИОННОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ И КИНЕТИКУ ФЛОТАЦИИ**

Л. Цветичанин¹, П. Лазич², Д. Вучинич²

¹E-mail: lidijacveticanin@gmail.com, ул. Чика-Любина, 15/IV, г. Белград, Сербия
²Горно-геологический факультет Белградского университета, г. Белград, Сербия

Представлены результаты лабораторных испытаний флотационного извлечения и кинетики флотации галенита в зависимости от крупности частиц и концентрации бутилового ксантогената калия. Установлено, что флотационное извлечение галенита и скорость флотации снижаются с уменьшением крупности зерен менее 38 мкм, а также со снижением концентрации собирателя. Выявлено, что на флотационное извлечение крупность зерен галенита влияет в большей мере, чем концентрация собирателя. Данные выводы являются результатом анализа множественных корреляций между флотационным извлечением галенита, расходом собирателя и крупностью зерен, так как частные коэффициенты корреляции и общий коэффициент корреляции показали тесную зависимость между указанными параметрами.

Кинетика флотации, флотационное извлечение, крупность галенита, концентрация собирателя, множественная корреляция

DOI: 10.15372/FTPRI20180314

При рудоподготовке свинцово-цинковых руд галенит переизмельчается, так как его твердость меньше, чем твердость других сопутствующих минералов, а именно минералов хвостов. В процессе обогащения это отрицательно отражается на флотационном извлечении галенита, поскольку мелкие частицы создают сложности для флотационного извлечения и кинетики флотации. Влияние крупности минеральных зерен на кинетику флотации — предмет многих исследований [1–12]. Переизмельчение сокращает извлечение и скорость флотации, т. е. для мелких классов крупности (менее 38 мкм) значения параметров процесса (скорость флотации, выраженная с помощью константы скорости флотации, и флотационное извлечение) значительно ниже, чем для крупных частиц (более 38 мкм), и резко снижаются с уменьшением крупности зерен менее 18 мкм [13].

Помимо того, что крупность минеральных зерен влияет на кинетику процесса, она оказывает большое влияние и на адсорбцию собирателя [14, 15]. Известно, что мелкие и среднечрупные зерна требуют меньшее количество собирателя [2, 3] для однослойного покрытия, что характерно для хемосорбции. Для однослойного покрытия зерен большей крупности расход собирателя на зерно соразмерен его площади. На рис. 1 приведена корреляция флотируемости, гидрофобности и крупности зерен.

Работа выполнена в рамках проектов TR 33045, TR 33007 и TR 176010, финансируемых Министерством образования, науки и технологии Республики Сербии.

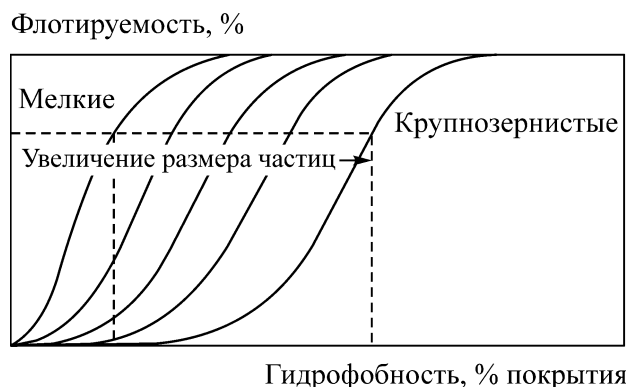


Рис. 1. Зависимость флотуемости минерала от гидрофобности поверхности зерен разной крупности [3]

Видно, что для данной крупности зерен повышение степени гидрофобности приводит к увеличению флотуемости. С уменьшением размеров зерен меняется не только удельная поверхность, но и адсорбционная способность. В [2, 3, 15] показано, что мелкие зерна по сравнению с крупными адсорбируют большее количество собирателя на единицу массы. Увеличенный расход собирателя в результате присутствия мелких зерен требует повышенной дозировки реагента при флотации руды, так как необходимо обеспечить достаточное количество собирателя для покрытия поверхности крупных зерен, что является одним из важных условий успешного проведения процесса флотации. Поскольку в определенном объеме пульпы обычно находится большое число мелких зерен, общее потребление собирателя значительно растет. По той же причине общая продолжительность флотации увеличивается. Испытания, проведенные с галенитом [16], показали, что с уменьшением крупности минеральных зерен, т. е. с увеличением удельной поверхности, растет и количество адсорбированного ксантата на единицу массы.

Самым распространенным способом повышения показателей флотационного обогащения, применяемым в промышленных условиях, является увеличение концентрации собирателя или продление времени флотации руды, в которой преобладают мелкие классы крупности. Цель настоящей работы — сравнительный анализ влияния концентрации собирателя и крупности зерен галенита на флотационное извлечение.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

Пробы чистых зерен галенита для испытаний отбирались вручную из свинцово-цинковой руды месторождения “Рудник” (Сербия). Измельчение проб осуществлялось в агатовой ступке до крупности – 38 мкм. Методом декантации Бейкера проведена классификация проб на классы крупности – 38 + 23 мкм, – 23 + 18 мкм, – 18 + 9 мкм и – 9 + 0 мкм. Эксперименты обогащения выполнялись во флотокамере беспенной флотации типа Livschits (рис. 2) на пробах массой 1 г каждого класса крупности, причем концентраты были выделены в зависимости от времени флотации $t = 1, 3, 5$ и 10 мин.

Во всех экспериментах время подготовительной обработки составляло 3 мин, частота вращения магнитной мешалки и объем воздуха (100 мл/мин) были постоянными. Водородный показатель рН пульпы равен 8.6. Испытания проводились в зависимости от концентрации собирателя: 0.2, 0.5, 1.0 и 10.0 мг/л для каждого класса крупности.

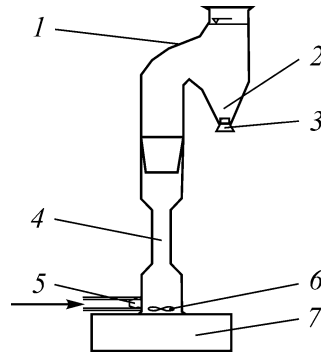


Рис. 2. Флотокамера для беспенной флотации: 1 — флотокамера; 2 — секция для флотируемого материала; 3 — резиновая пробка; 4 — суженная часть флотокамеры; 5 — капиллярная трубка для подачи воздуха; 6 — импеллер; 7 — магнитная мешалка

МНОЖЕСТВЕННАЯ И ЧАСТНАЯ КОРРЕЛЯЦИИ

В настоящей работе исходили из предположения о том, что извлечение галенита одновременно зависит от крупности зерен и концентрации собирателя. Для проверки этого предположения применялись статистические методы множественной и частичной корреляции, для показателей взаимосвязей использовались коэффициенты корреляции [17].

Если зависимая переменная отмечена x_1 , а независимые переменные — x_2 и x_3 и если их значения равны $x_{1i}, x_{2i}, x_{3i} \dots (i = 1, 2, 3 \dots)$, то уравнение линейной регрессии имеет вид

$$x_1 = a_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + \dots + b_n x_n,$$

где $a_1, b_2, b_3, \dots, b_n$ — константы.

Для зависимости извлечения минерала x_1 от размера зерна x_2 и концентрации собирателя x_3 уравнение линейной регрессии имеет следующий вид:

$$x_1 = a_{1.23} + b_{12.3} x_2 + b_{13.2} x_3.$$

Чтобы показать, что константа a_1 в функции от x_1 и не зависит от x_2 и x_3 , ее обозначили $a_{1.23}$. Данное уравнение в трехмерной системе координат изображается поверхностью регрессии (рис. 3).

Из условия минимума суммы квадрата отклонений

$$S_{1.23}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (a_{1.23} + b_{12.3} x_{2i} + b_{13.2} x_{3i} - x_{1i})^2$$

получаем систему уравнений:

$$\begin{aligned} \sum x_{1i} &= a_{1.23} n + b_{12.3} \sum x_{2i} + b_{13.2} \sum x_{3i}, \\ \sum x_{1i} x_{2i} &= a_{1.23} \sum x_{2i} + b_{12.3} \sum x_{2i}^2 + b_{13.2} \sum x_{2i} x_{3i}, \\ \sum x_{1i} x_{3i} &= a_{1.23} \sum x_{3i} + b_{12.3} \sum x_{2i} x_{3i} + b_{13.2} \sum x_{3i}^2. \end{aligned}$$

Решением настоящей системы уравнений определяются коэффициенты $a_{1.23}$, $b_{12.3}$ и $b_{13.2}$, т. е. получаем уравнение линейной регрессии. При включении в данное уравнение значений x_{2i} и x_{3i} определяются расчетные значения флотационного извлечения x_{r1i} .

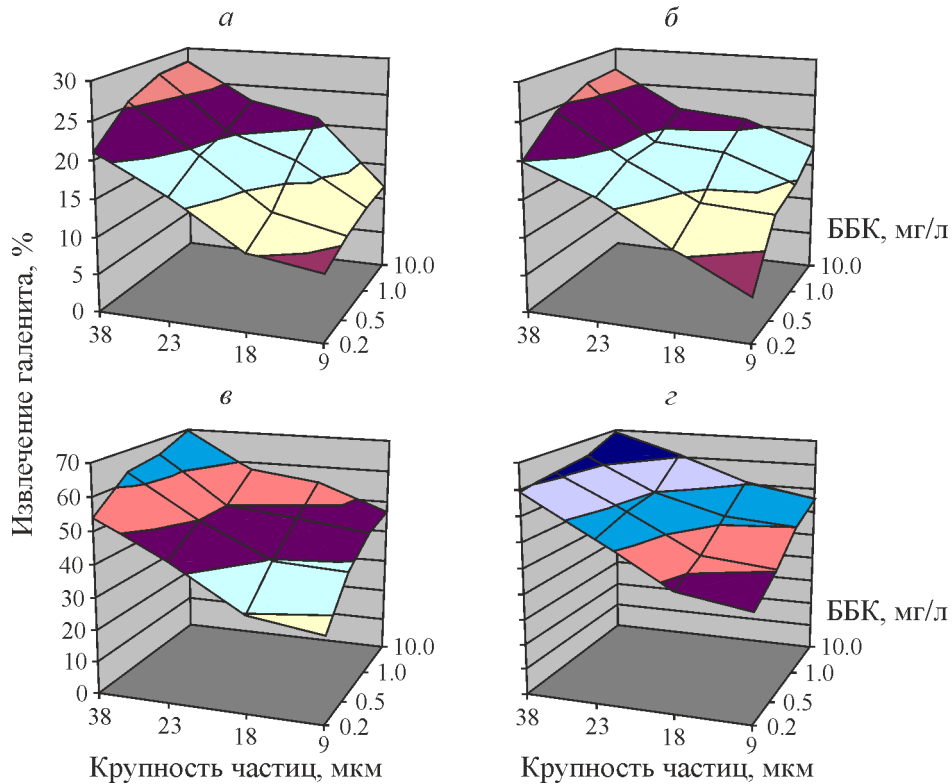


Рис. 3. Флотационное извлечение галенита в зависимости от крупности зерен и концентрации собирателя при времени флотации, мин: а — 1; б — 3; в — 5; г — 10

Далее рассчитывается стандартная погрешность между экспериментальными и расчетными значениями извлечения:

$$S_{1,23} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (x_{li} - x_{rli})^2} .$$

Коэффициент множественной корреляции вычисляется по формуле

$$R_{1,23} = \sqrt{1 - \frac{S_{1,23}^2}{s_1^2}} ,$$

где $s_1 = \sqrt{1/n \sum x_{li}^2 - (1/n \sum x_{li})^2}$ — стандартное отклонение.

Значения коэффициентов множественной корреляции изменяются от 0 до 1, причем связь между переменными линейная и сильная, если значение коэффициента равно 1; переменные — линейно некоррелятивные, если значение коэффициента равно 0.

При необходимости определения корреляции между одной независимой и одной зависимой переменной, когда все остальные независимые переменные считаются постоянными, частичная зависимость выражается частичными коэффициентами корреляции, рассчитываемыми по формулам:

$$r_{12} = \frac{n \sum x_{1i} x_{2i} - \sum x_{1i} \sum x_{2i}}{\sqrt{[n \sum x_{1i}^2 - (\sum x_{1i})^2][n \sum x_{2i}^2 - (\sum x_{2i})^2]}} ,$$

$$r_{13} = \frac{n \sum x_{1i} x_{3i} - \sum x_{1i} \sum x_{3i}}{\sqrt{[n \sum x_{1i}^2 - (\sum x_{1i})^2][n \sum x_{3i}^2 - (\sum x_{3i})^2]}} .$$

Частичные коэффициенты корреляции использовали для оценки влияния крупности зерен x_2 и концентрации собирателя x_3 на флотационное извлечение галенита x_1 , а также для оценки данного влияния. Чтобы определить одновременное влияние двух указанных параметров на извлечение галенита, применяли коэффициент множественной корреляции $R_{1,23}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 показаны кумулятивные флотационные извлечения галенита для испытываемых классов крупности при различных концентрациях собирателя и разном времени флотации [19].

ТАБЛИЦА 1. Флотационное извлечение галенита

Класс крупности, мкм	Время флотации, мин	Концентрация собирателя, мг/л			
		0.2	0.5	1.0	10.0
		Флотационное извлечение, %			
–38+23	1	21.11	25.61	27.71	28.09
–23+18		16.28	19.15	20.47	22.83
–18+9		10.23	12.55	17.07	20.93
–9+0		8.82	10.45	11.46	11.76
–38+23	3	39.87	48.78	53.01	53.93
–23+18		32.56	37.23	37.78	43.48
–18+9		21.59	27.77	36.59	41.86
–9+0		11.88	26.59	29.41	35.11
–38+23	5	53.88	63.41	65.06	69.66
–23+18		43.02	50.00	50.00	57.61
–18+9		29.55	39.71	47.56	54.65
–9+0		26.31	38.24	44.71	46.45
–38+23	10	79.27	81.37	83.15	89.10
–23+18		63.83	67.89	69.86	80.72
–18+9		47.35	53.11	62.20	70.65
–9+0		42.57	50.25	60.26	65.40

Отметим, что с увеличением продолжительности флотации растет флотационное извлечение галенита по всем испытываемым классам крупности. Оно растет также и с увеличением концентрации собирателя. Но максимальное извлечение, полученное для мелких классов крупности (–18+9 и –9+0 мкм), значительно ниже извлечения для классов –38+23 и –23+18 мкм при равных условиях, что вызывает сложности в условиях промышленной флотации [18]. Помимо того, классы крупности –18+9 и –9+0 мкм медленно флотируются, однако больших различий во флотационном извлечении у этих двух классов крупности при данной концентрации собирателя не обнаружено.

Выявлено, что независимо от времени флотации флотационное извлечение галенита уменьшается быстрее со снижением крупности зерен, чем извлечение в зависимости от концентрации собирателя [19]. Данное изменение значения извлечения отражено на диаграммах, полученных на основании данных табл. 1 (см рис. 3).

В табл. 2 приведены результаты расчетов извлечения галенита при флотации в зависимости от крупности зерна и концентрации собирателя.

ТАБЛИЦА 2. Уравнения линейной регрессии, частичных и множественных коэффициентов корреляций для разного времени флотации

Уравнение линейной регрессии	Время флотации, мин	Частичный коэффициент корреляции	Множественный коэффициент корреляции $R_{1,23}$
$x_1 = 1.02 + 0.78x_2 - 0.26x_3$	1	$r_{12} = 0.9764452$ $r_{13} = 0.8617024$	0.97827
$x_1 = -5.25 + 1.91x_2 - 1.33x_3$	3	$r_{12} = 0.9884033$ $r_{13} = 0.8354122$	0.99961
$x_1 = 10.8 + 1.69x_2 - 0.53x_3$	5	$r_{12} = 0.9971130$ $r_{13} = 0.8816904$	0.99877
$x_1 = 24.42 + 1.86x_2 - 0.6x_3$	10	$r_{12} = 0.9848432$ $r_{13} = 0.8701421$	0.98657

Исходя из результатов коэффициентов частных и множественных корреляций для разного времени флотации (табл. 2), можно сделать вывод, что на изменение флотационного извлечения в большей мере влияет крупность зерен (более высокий частичный коэффициент корреляции r_{12}), чем концентрация собирателя (меньшие значения r_{13}).

ВЫВОДЫ

Флотационное извлечение галенита для всех классов крупности меньше 38 мкм увеличивается с ростом концентрации собирателя и увеличением крупности зерна. При продлении времени флотации более 3 мин отмечено значимое увеличение флотационного извлечения для каждой из испытываемых концентраций собирателя. На повышение извлечения галенита большее влияние оказывает изменение крупности зерен минерала, чем изменение концентрации собирателя. Согласно частичным и множественным коэффициентам корреляции для разных времен флотации, можно сделать вывод, что размер зерна оказывает большее влияние на флотационное извлечение галенита, чем концентрация собирателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Trahar W. J. and Warren L. J.** The floatability of very fine particles — a review, *Int. J. of Mineral Processing*, 1976, Vol. 3. — P. 103–131.
2. **Trahar W. J.** The selective flotation of galena from sphalerite with special reference to the effects of particle size, *Int. J. of Mineral Processing*, 1976, Vol. 3. — P. 151–166.
3. **Trahar W. J.** A rational interpretation of the role of particle size in flotation, *Int. J. of Mineral Processing*, 1981, Vol. 8. — P. 289–327.
4. **Dobby G. S. and Finch J. A.** Particle size dependence in flotation derived from a fundamental model of the capture process, *Int. J. of Mineral Processing*, 1987, Vol. 21. — P. 241–260.
5. **Radoev B. P., Alexandrova L. B., Tchaljovska S. D.** On the kinetics of froth flotation, *Int. J. of Mineral Processing*, 1990, Vol. 28. — P. 127–138.
6. **Schulze H. J.** New theoretical and experimental investigation on stability of bubble/particle aggregates in flotation: a theory on upper particle size of floatability, *Int. J. of Mineral Processing*, 1993, Vol. 4. — P. 241–259.

7. **Hewitt D., Fornasiero D., Ralston J.** Bubble particle attachment efficiency, *Minerals Engineering*, 1994, Vol. 7, No. 5, 6. — P. 657–665.
8. **Loewenberg M. and Davis R. H.** Flotation rates of fine spherical particles and droplets, *Chemical Engineering Science*, 1994, Vol. 49, No. 23. — P. 3923–3941.
9. **Polat M. and Chander S.** First-order flotation kinetics models and methods for estimation of the true distribution of flotation rate constants, *Int. J. of Mineral Processing*, 2000, Vol. 58. — P. 145–166.
10. **Lazić P., Čalić N.** Influence of collector consumption on flotation kinetics, 9th Balkan Conference of Mineral Processing, Istanbul, 2001. — P. 193–196.
11. **Tao D.** Role of bubble size in flotation of coarse and fine particles — a review, *Separation Science and Technology*, 2005, Vol. 39, No. 4. — P. 741–760.
12. **Welsby S. D. D., Vianna S. M., Franzidis J.-P.** Assigning physical significance to floatability components, *Int. J. of Mineral Processing*, 2010, Vol. 97. — P. 59–67.
13. **Cvetičanin L., Lazić P., Vučinić D., Kostović M.** Effect of galena grain size on flotation kinetics, *J. of Mining Science*, 2015, Vol. 51, No. 3. — P. 591–595.
14. **Jameson G. J.** The effect of surface liberation and particle size on flotation rate constants, *Minerals Engineering*, 2012, Vol. 36–38. — P. 132–137.
15. **Bazin C. and Proulx M.** Distribution of reagents down a flotation bank to improve recovery of coarse particles, *Int. J. of Mineral Processing*, 2001, Vol. 61. — P. 1–12.
16. **Manojlović-Gifing M.** *Teorijske osnove flotiranja*, Beograd, 1969.
17. **Vukadinović V. S.** *Elementi teorije verovatnoće i matematičke statistike*, Privredni pregled-Beograd, 1990.
18. **Cvetičanin L., Lazić P., Vučinić D., Knežević D.** The galena flotation in function of grindability, *J. of Mining Science*, 2012, Vol. 48, No. 4. — P. 760–764.
19. **Cvetičanin L.** *Uticaj krupnoće galenita na kinetiku flotiranja*, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, 2017.

Поступила в редакцию 27/X 2017