

УДК 669.2

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-25-32>

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕЙ РУДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКОЙ УЛЬТРАЗВУКОМ

Замотин П.А., Лобанов В.Г.

Уральский федеральный университет имени первого Президента Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Постановка задачи (актуальность работы): описаны основные научные и практические результаты исследования повышения эффективности измельчения золотосодержащих пород в процессе рудоподготовки с применением поверхностно-активных веществ. Изучены механизмы действия поверхностно-активных веществ на поверхность минерала; изучен ультразвуковой способ интенсификации воздействия поверхностно-активных веществ на минеральную структуру; разработан принцип подбора поверхностно-активных веществ. Цель работы: исследовать и реализовать технологии применения поверхностно-активных веществ на стадии измельчения золотосодержащих руд, позволяющие повысить эффективность всей технологии. Используемые методы: применялся анализ литературных и патентных источников, лабораторные исследования измерения краевого угла, исследования процессов измельчения в лабораторной стержневой мельнице. Новизна: предложена методика подбора поверхностно-активных веществ через измерение краевого угла смачивания на поверхности минерала, разработана технология по интенсификации процесса измельчения, отличается от аналогов оборотным использованием раствора для экономии последнего, а также тем, что в качестве дополнительного разрушающего физического воздействия используются не электрические, а акустические импульсы (ультразвук). Результат: наименьшие углы смачивания на поверхности пирита и руды месторождения Макмал наблюдаются при использовании растворов с КИСК-1, -2, Antiprex D и ЛСН (лаурилсульфат натрия). По выходу каждого класса после процесса измельчения наиболее эффективными ПАВ являются: КиСК-1, -3, -8, Antiprex D и ЛСН. Практическая значимость: сделаны выводы относительно эффективности описанной технологии и целесообразности дальнейших исследований в этом направлении. экспериментально установлены реагенты, которые интенсифицируют процесс измельчения золотосодержащих руд, на их основе разработана технология, получен патент «Способ измельчения минерального сырья» RU 2641527.

Ключевые слова: золото, руда, поверхностно-активные вещества, измельчение, ультразвук.

Введение

Рудоподготовка является одной из наиболее затратных стадий переработки минерального сырья, что делает повышение её эффективности чрезвычайно актуальным. В качестве одной из мер, направленных на совершенствование процессов вскрытия руд и концентратов перед обогащательными и гидрометаллургическими процессами, в последние годы специалисты все чаще рассматривают измельчение руды в присутствии поверхностно-активных веществ [1-4]. Данный прием отличается технологической простотой, его использование не требует значимых капитальных затрат.

Эффект от измельчения сырья в присутствии ПАВ может заключаться в увеличении производительности мельниц при сохранении прежней тонины помола, уменьшении удельных расход

электроэнергии, шаров и футеровки. Иногда основную цель метода усматривают в увеличении количества извлеченного ценного компонента за счёт избирательности вскрытия минералов при неизменных затратах. Это связывают с особенностями действия ПАВ. Несмотря на очевидную перспективность способа, его особенности плохо изучены, результаты исследований противоречивы, а данные проверки в промышленных условиях не поддаются корректной интерпретации. Чаще всего это обусловлено тем, что методика лабораторных исследований не позволяет реализовать измельчение в открытом цикле с циркулирующей нагрузкой, влияющей на баланс и действующие концентрации ПАВ. Кроме того, исследователи не учитывают особенности поведения поверхностно-активных веществ в минеральных суспензиях при интенсивном массообмене и динамично обновляемой поверхности.

Однако рудоподготовка – лишь вспомогательная операция. Необходимо изучать неиз-

© Замотин П.А., Лобанов В.Г., 2018

бежное влияние ПАВ на последующие обогащенные и гидрометаллургические процессы.

Теория, материалы и методы исследования, предварительные выводы

В настоящей работе изучены перспективы и некоторые особенности измельчения золотосодержащих руд в присутствии ПАВ. Ее целью на первоначальном этапе было выбрать наиболее эффективное вещество. Методики выбора ПАВ для измельчения минерального сырья в литературе не обнаружено, чаще всего в исследованиях используются ПАВ, имеющиеся в наличии. Эффективность действия ПАВ зависит от физико-химических свойств материала и в разных системах «минерал-вода» может оказывать как положительное, так и отрицательное действие. Адсорбционные слои ПАВ радикально изменяют межмолекулярные силы сцепления, в результате снижается поверхностная энергия, так же как и работа по образованию новой поверхности на границе фаз. Структура минеральных частиц в процессе добычи сырья и диспергации приобретает сеть микротрещин. В наибольшей степени микродефектами насыщается поверхность рудных частиц.

Эффект снижения прочности поверхности сорбента под действием ПАВ первоначально объясняли их проникновением в трещины с расклинивающим действием. Но это справедливо лишь для дефектов значительного размера, а часть трещин и микропор меньше молекул ПАВ.

Позднее механизм разрушающего действия ПАВ объяснили тем [5], что при образовании трещины ионы материала приходят в активированное состояние, неуравновешенное разорванными связями, смещаются в сторону притягивающих их к себе мигрирующих ионов ПАВ, в том числе в устья трещин, скапливаясь в которых, препятствуют их смыканию. При этом молекулы ПАВ адсорбируются на поверхности полярными группами к твердому телу, как это показано на рис. 1. С увеличением концентрации ПАВ усиливается взаимодействие углеводородных цепей между собой, что благоприятствует вертикальной ориентации их молекул и максимальной адсорбции.

Для многих минералов уменьшение пластичности и прочности при снижении поверхностной энергии во время деформации и развития тре-

щины объясняется также давно доказанным и проверенным эффектом П.А. Ребиндера [5, 6]. Новые микротрещины, в том числе в самих кристаллах, могут образовываться под действием ПАВ при меньших напряжениях.

В настоящее время известно достаточно большое число различных классификаций поверхностно-активных веществ. По механизму их действия, характеру диссоциации, токсичности и другим свойствам П. А. Ребиндер [7] разделяет их в соответствии с состоянием в водных растворах на две группы – полукolloидные ПАВ, обладающие моющими свойствами (обычные и синтетические мыла) и ПАВ, образующие в воде истинные растворы (спирты, жидкие кислоты, амины). В соответствии с рекомендациями организации по стандартизации, III Международный конгресс по ПАВ принял классификацию, основанную на химической структуре соединений [8]. В соответствии с ней выделяют четыре основных класса: анионоактивные (АПАВ), катионоактивные (КПАВ), неионогенные (НПАВ) и амфотерные (АмПАВ) поверхностно-активные вещества. Помимо органических ПАВ с асимметричной молекулярной структурой на практике широко используют растворы солей, расплавы и прочие электролиты.

Одной из главных особенностей эффекта Ребиндера является его избирательность. Она состоит в том, что требуемое изменение свойств твердого тела может обеспечить только родственное данному телу поверхностно-активное вещество. Так, по данным автора [9], наиболее активными по отношению к телам с ионной или ионно-ковалентной связью являются полярные жидкости – расплавы солей или растворы электролитов. Для молекулярных кристаллов наибольший эффект достигается в органических жидкостях типа бензола, гептана, ацетона. Кроме того, зависимость энергии взаимодействия от количества молекул ПАВ в растворе, как правило, имеет явно выраженный максимум, т.е. наибольший эффект достигается при конкретной и строго выдержанной концентрации.

Кроме улучшения размалываемости, при использовании ПАВ предотвращается адгезия измельченного сырья в виде образования твердой оболочки на мелющих элементах и отодвигается в область более высоких значений удельной поверхности агрегация сверхтонких частиц.

Процесс разрушения структуры твердого тела многостадийный и начинается в местах дефектов [10]. На стадии развития микротрещины большое значение имеют ПАВ, ослабляющие связи на поверхности материала. Поскольку дислокации обладают избыточной свободной энергией, на них происходит наиболее активная адсорбция, увеличивая количество трещин. Процесс лавинный, с явной положительной обратной связью: чем больше дефектов, тем сильнее действие ПАВ, а на бездефектных структурах оно отсутствует.

С помощью ПАВ можно менять смачиваемость тел вплоть до ее инверсии – гидрофобные поверхности делать гидрофильными и наоборот. Механизм инверсии связан с определенной ориентацией молекул ПАВ в адсорбционном слое. Если поверхность гидрофильна, то адсорбированные молекулы взаимодействуют своими полярными группами с поверхностью, а неполярными цепями обращаются наружу, вследствие чего твердая поверхность становится гидрофобной. Когда твердая поверхность гидрофобна, адсорбированные на ней молекулы ПАВ обращаются к твердому материалу углеводородными цепями, а полярными группами – наружу, поверхность становится гидрофильной.

Наиболее эффективным методом исследования влияния ПАВ в паре жидкости с твердым телом является измерение краевого угла смачивания. Были приготовлены растворы нескольких анионоактивных ПАВ одинаковой концентрации. По традиционной методике [11] проведен замер краевого угла смачивания их капель на стекле – хорошо воспроизводимой твердой поверхности (**рис. 2**). Сравнивая эти углы (определяемые силой поверхностного натяжения), можно судить об эффективности того или иного ПАВ. Как показали результаты измерения, наилучшими являются КИСК-1, КИСК-2, КИСК-3 и Antiprex D. В **табл. 1** представлены результаты измерения краевых углов смачивания.

В качестве минеральных образцов, на поверхности которых оценивали краевой угол смачивания, использовали пирит Березовского месторождения и руду золоторудного месторождения Макмал. Плоскую поверхность (до 5 см²) шлифовали, полировали известными методами, промывали спиртом и дистиллированной водой.

На поверхность высушенного образца пипеткой наносили каплю раствора с заданной кон-

центрацией ПАВ и через 1 мин после достижения равновесного профиля капли замеряли краевой угол. Для каждого образца ПАВ производилось 10 замеров краевого угла; усредненное значение приведено на **рис. 1** и **2**.

Наименьшие углы смачивания наблюдаются при использовании растворов с КИСК-1, -2, Antiprex D и ЛСН (лаурилсульфат натрия). Это означает лучшую смачиваемость минеральных поверхностей в присутствии данных реагентов, более глубокое проникновение молекул растворителя в микротрещину, а значит, увеличивает вероятность того, что микротрещина не сомкнется и процесс разрушения будет более эффективным.

Для проверки указанных предположений в одной и той же лабораторной стержневой мельнице проведена подготовка руды «Макмал» с указанными ПАВ при наиболее близких к промышленным параметрах измельчения – масса навески 500 г, Ж:Т = 1:1. Ситовая характеристика исходной руды приведена в **табл. 2**.

Таблица 2

Класс, мм	%
+2,5	81,2
+1,6	14,0
+0,65	2,0
+0,315	1,0
+0,2	0,8
+0,1	0,7
+0,074	0,2
-0,074	0,1

В соответствии с идеологией измельчения руд в присутствии ПАВ основной результат заключается в большей скорости процесса при прочих равных условиях. При этом в случае достаточной большой продолжительности измельчения ситовая характеристика выхода без ПАВ и в их присутствии может не иметь значимых различий. На основании результатов предварительных опытов максимальное различие в крупности продукта измельчения, в частности выхода класса -0,074 мм, для указанных условий отмечается при продолжительности измельчения 15 мин. Результаты опытов представлены на **рис. 3**.

Таблица 1

ПАВ	Вода	КИСК-1	КИСК-2	КИСК-3	КИСК-4	КИСК-8	Antiprex D
α , град	28	22	17	25	31	31	25

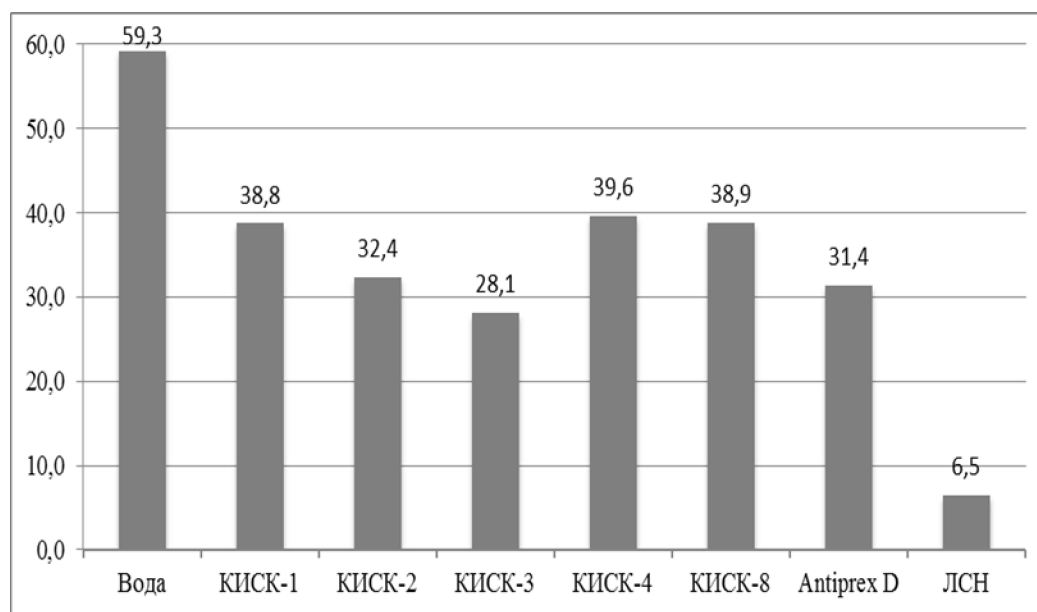


Рис. 1. Значения краевого угла смачивания водных растворов ПАВ на поверхности пирита, град

По выходу каждого класса можно сказать, что наиболее эффективными ПАВ являются: КИСК-1, -3, -8, Antiprex D и ЛСН. Ситовая характеристика выхода руды «Макмал» при использовании различных ПАВ приведены в **табл. 3**.

Данные результаты позволяют сказать, что применение ПАВ даёт возможность за один и тот же промежуток времени увеличить выход каждого класса, что положительно отразится на экономической эффективности процесса. Для еще большей его интенсификации возможно совместное применение дополнительного электрофизического воздействия.

Известен выбранный в качестве прототипа способ измельчения минерального сырья, включающий предварительную его обработку водным раствором ПАВ с расходом 25-100 г/т и последующее механическое измельчение. В процессе предварительной обработки дополнительно воздействуют импульсными электрическими разрядами. К недостаткам указанного способа следует отнести негативное влияние высоковольтных импульсов (50 кВ) на молекулы ПАВ. Большинство известных поверхностно-активных веществ, преимущественно высокомолекулярных, при указанном воздействии окисляются, что влечет за собой увеличенный расход реагента. Другим существенным недостатком прототипа является неконтролируемое изменение ионного состава водной фазы пульпы при электроимпульсной обработке минерального сырья, которое может привести к нарушению последующего технологическо-

го процесса. Кроме того, использование высокого напряжения в процессах рудоподготовки существенно усложняет организацию производства в части безопасности труда.

В связи с этим выбрано ультразвуковое (УЗ) воздействие с последующим механическим измельчением, что обеспечило заявляемому способу более эффективное использование ПАВ в сравнении с аналогами. В процессе обработки сырья ультразвуком водный раствор, модифицированный ПАВ, интенсивно проникает в мельчайшие дефекты кристаллической структуры, прочностные свойства минералов ослабляются существенно сильнее, чем в аналогичных способах, и последующее измельчение протекает весьма эффективно.

Перед измельчением руда помещалась в ультразвуковую ванну UM-4 польской фирмы UNITRA UNIMA, в которой создавались ультразвуковые волны частотой диапазона 25 кГц. Ультразвуковую ванну предварительно заполняли проточной водой или раствором ПАВ, затем засыпали руду. Соотношение Ж:Т составляло 2:1, навеска руды 500 г. Расход ПАВ варьировали от 200 до 300 г/т. Ультразвуковую обработку вели в течение 10 мин при комнатной температуре. Далее руду с жидкостью и раствором извлекали из ванны и отправляли на измельчение в том же растворе. После этого руду сушили и проводили ситовой анализ. Отмечался прирост класса руды - 0,4 мм до 12% по сравнению с измельчением без ультразвука (**рис. 4**).

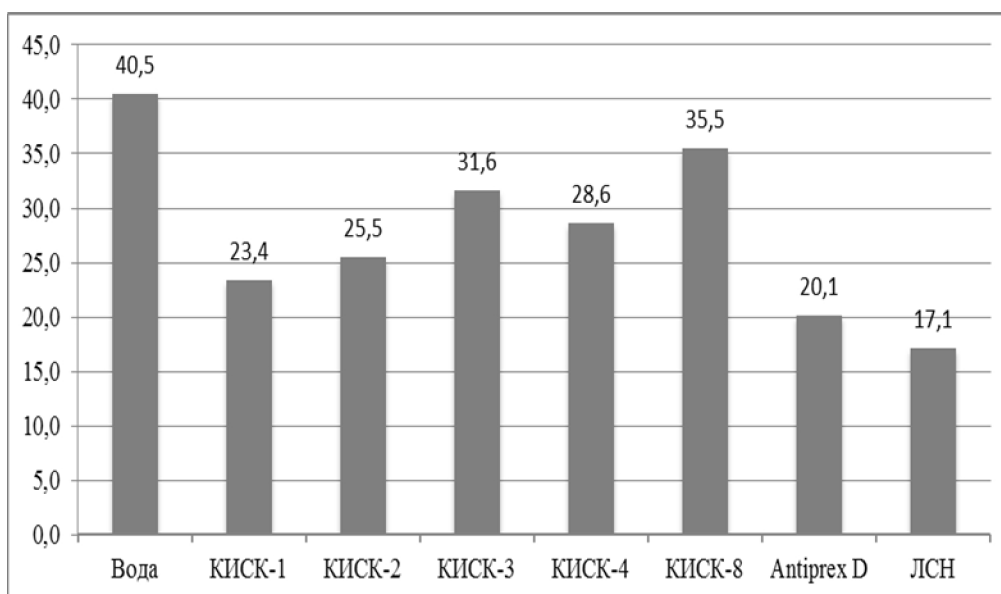


Рис. 2. Значения краевого угла смачивания водных растворов ПАВ на поверхности образца руды «Макмал», град

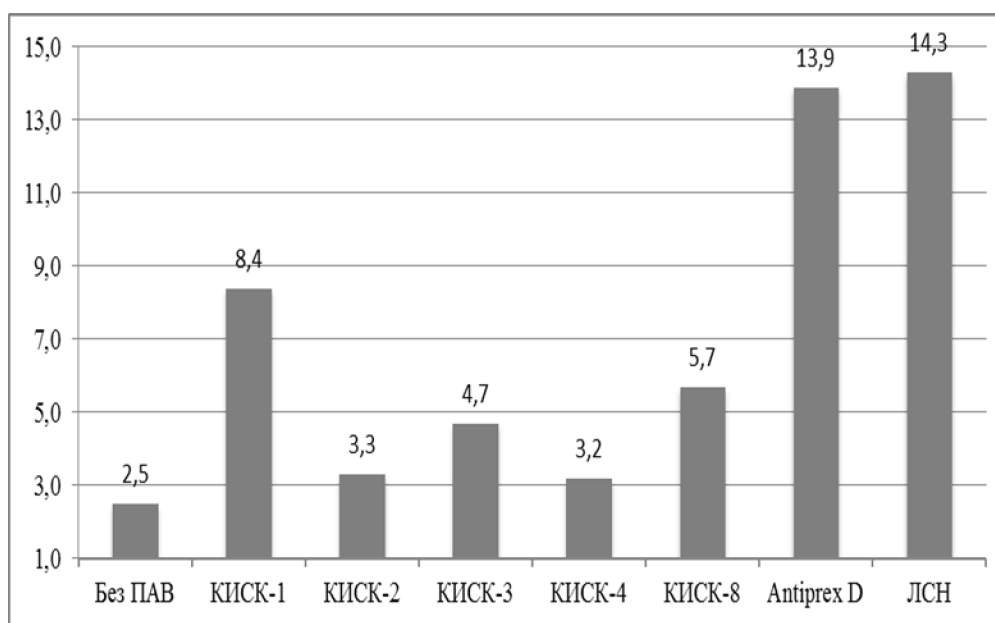


Рис. 3. Выход класса $-0,074$ мм с различными ПАВ, %

Таблица 3

Класс, мм	Выход класса, %							
	Без ПАВ	КИСК-1	КИСК-2	КИСК-3	КИСК-4	КИСК-8	Antiprex D	ЛСН
+2,5	6,3	3,2	3,2	3,6	3,3	3,0	3,7	3,0
+1,6	6,7	3,5	3,6	5,2	5,1	3,5	4,0	3,5
+0,65	13,5	7,7	8,1	8,3	8,5	7,5	7,9	8,0
+0,315	12,8	11,2	10,8	11,7	10,3	10,9	11,0	10,0
+0,2	18,7	16,2	15,0	15,8	14,6	15,9	17,5	15,2
+0,1	12,5	18,3	17,5	16,2	20,7	19,3	20,6	22,0
+0,074	27,0	31,4	38,0	33,9	33,5	32,6	21,5	24,0
-0,074	2,5	8,4	3,3	4,7	3,2	5,7	13,9	14,3

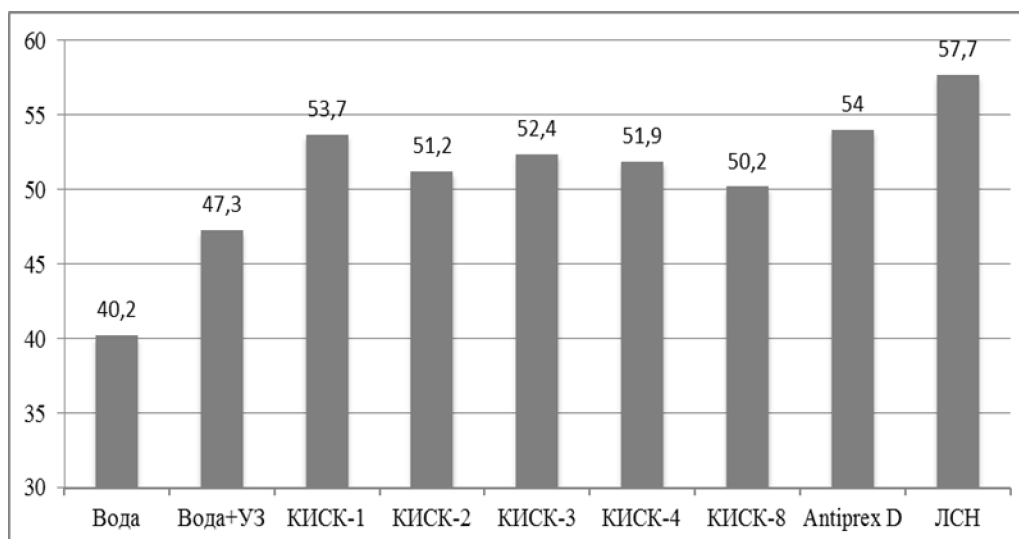


Рис. 4. Выход класса -0,4мм после УЗ-обработки, %

Заключение

Таким образом, экспериментальным путём подтверждено однозначно положительное влияние обработки растворами ПАВ и ультразвуком на измельчение исходного сырья в процессе рудоподготовки, повышение – при тех же затратах энергии и времени – выхода мелкодисперсных классов, последующая переработка которых наиболее продуктивна. Что же касается побочных эффектов метода, его влияния на другие обогащательные и гидрометаллургические операции, их изучение продолжается.

В частности, исследование цианистого выщелачивания пока не дало каких-либо результатов в связи с тем, что показатели извлечения постоянно различаются. Существует вероятность того, что молекулы ПАВ обволакивают частицы золота и препятствуют проникновению цианида. Для выяснения этого необходимы дополнительные работы в данном направлении.

Список литературы

1. Пат. 2431689 Российская Федерация, МПК C22B11/08.
2. Пат. 2347620 Российская Федерация, МПК B02C23/06.
3. Пат. 2096504 Российская Федерация, МПК C22B11/00.
4. Литвинова В.М. Совершенствование технологических методов измельчения упорных золотосодержащих руд. Хабаровск, 2008.
5. Горюнов Ю.В., Перцов Н.В., Сумм Б.Д. Эффект Ребиндера. М., 1966.
6. Ребиндер П.А., Щукин Е.Д. Поверхностные явления в твердых телах в процессах их деформации и разрушения // Успехи физических наук. 1972. Т. 108, вып. 1. С. 3.
7. Ребиндер П.А. Взаимосвязь поверхностных и объемных свойств растворов поверхностно-активных веществ // Успехи коллоидной химии. 1973. С. 9–68.
8. Абрамзон А.А., Зайченко Л.П., Файнгольд С.И. Поверхностно-активные вещества. Синтез, анализ, свойства, применение. М.: Химия, 1988. 200 с.
9. Щукин Е.Д. Новые исследования физико-химических явлений в процессах деформации и разрушения твердых тел // Успехи коллоидной химии. 1973. С. 159–173.
10. Вибрационная дезинтеграция твердых материалов / Ревнивцев В.И., Денисов Г.А., Зарогатский Л.П. и др. М.: Недра, 1992. 430 с.
11. Лабораторные работы и задачи по коллоидной химии: учеб. пособие / под ред. Ю.Г. Фролова и А.С. Гродского. М.: Химия, 1986. 216 с.
12. Somani, Aditya, Nandi, Tapas K., Pal, Samir L. Pre-treatment of rock prior to comminution – A critical review of present practices // Internation Journal of Mining Science and Technology. 2017. 27. №2. P. 339-348.
13. Dr. Manish Raj, Mr. J.C. Pandey, Dr. N. Bandyopadhyay, Ms. R. Sriprya. A process of beneficiation of iron ore like materials by treating their slurries with high intensity power ultrasound: patent №249608; 31.10.2011.
14. Aanan H.K., Dr. Shang, Julie Q., Improvement of Total Sulphur Measurement Techniques for Management of Reactive Mine Tailings // Electronic Thesis and Dissertation Repository. 2012.
15. V. M. Chakka, B. Altunccevahir, Q. Jin, Y. Li, and J. P. Liu. Surfactant assisted ball milling // Journal of applied phusycs. 99. 2006. P. 99-101.
16. Mahbub Ullah, Md. Edqub Ali. Urfactant-assisted ball milling // Universiti Malaya. 2013.

Поступила 23.04.18

Принята в печать 14.06.18

INTENSIFICATION OF GOLD ORE GRINDING PROCESS WITH THE HELP OF SURFACTANTS AND ADDITIONAL ULTRASONIC TREATMENT

Pavel A. Zamotin – Postgraduate Student,
Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia. E-mail: pavelzamotin@gmail.com

Vladimir G. Lobanov – PhD (Eng.), Professor
Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia.

Abstract

Problem Statement (Relevance): This paper describes the main scientific and practical results of the study into increasing the efficiency of gold-bearing rock grinding process by using surfactants during ore concentration stage. The authors looked at the action mechanism of the surfactants and at how to apply ultrasound to intensify the surfactant action on the mineral structure. The authors also developed an approach to selecting surfactants. **Objectives:** The objective of this research is to examine and implement the application of surfactants at the gold ore grinding stage to help enhance the entire process. **Methods Applied:** The authors did a review of the literature (including patent information), carried out laboratory tests to determine the contact angle, and analysed the grinding processes using a laboratory rod mill. **Originality:** The authors propose a technique for selecting surfactants through measuring the contact angle on the mineral surface. The authors developed a technique to help intensify the grinding process, which, in contrast to similar techniques, reuses the solution thus saving it and uses acoustic pulses (i.e. ultrasound), instead of electrical pulses, to create an additional destructive impact. **Findings:** The smallest contact angles on the surface of pyrite and ore from the Makmal deposit were observed when the solutions applied contained the following: KISK-1, -2, Antiprex D and SLS (sodium lauryl sulfate). By the size yield after grinding, the most effective surfactants included: KISK-1, -3, -8, Antiprex D and SLS. **Practical Relevance:** Conclusions were formulated regarding the effectiveness of the described technique and the relevance of further research in this area. Reagents were identified through experiments that can help intensify the gold ore grinding process. A relevant technique was developed, and the following patent – registered: "A grinding technique for mineral raw materials" (RU 2641527).

Keywords: Gold, ore, surfactants, grinding, ultrasound

References

1. Patent RF, no. 2431689, MPK S22V11/08.
2. Patent RF, no. 2347620, MPK V02S23/06.
3. Patent RF, no. 2096504, MPK S22V11/00.
4. Litvinova V.M. *Sovershenstvovanie tekhnologicheskikh metodov izmelcheniya upornykh zolotosoderzhashchikh rud* [Optimised grinding techniques for refractory gold ores]. Khabarovsk, 2008. (In Russ.)
5. Goryunov Yu.V., Pertsov N.V., Summ B.D. *Effekt Rebinder* [Rehbinder effect]. Moscow, 1966. (In Russ.)
6. Rebinder P.A., Shchukin E.D. Surface phenomena in solids during deformation and fracture. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Advancements in physics], 1972, vol. 108, iss. 1, p. 3. (In Russ.)
7. Rebinder P.A. Relationship between surface and bulk properties of surfactant solutions. *Uspekhi kolloidnoy khimii* [Advancements in colloid chemistry], 1973, pp. 9–68. (In Russ.)
8. Abramzon A.A., Zaychenko L.P., Fayngold S.I. *Poverkhnostno-aktivnye veshchestva. Sintez, analiz, svoystva, primeneniye* [Surfactants. Synthesis, analysis, properties, application]. Moscow: Khimiya, 1988, 200 p. (In Russ.)
9. Shchukin E.D. New research of physical and chemical phenomena characterizing deformation and fracture of solids. *Uspekhi kolloidnoy khimii* [Advancements in colloid chemistry], 1973, pp. 159–173. (In Russ.)
10. Revnitshev V.I., Denisov G.A., Zarogatsky L.P. et al. *Vibratsionnaya dezintegratsiya tverdykh materialov* [Vibration caused disintegration of solid materials]. Moscow: Nedra, 1992, 430 p. (In Russ.)
11. *Laboratornye raboty i zadachi po kolloidnoy khimii: ucheb. posobie* [Laboratory tests and problems in colloid chemistry]. Ed. by Yu.G. Frolov and A.S. Grodsky. Moscow: Khimiya, 1986, 216 p. (In Russ.)
12. Somani, Aditiya, Nandi, Tapas K., Pal, Samir L. Pre-treatment of rock prior to comminution – A critical review of present practices. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2017, 27, no. 2, pp. 339–348.
13. Dr. Manish Raj, Mr. J.C. Pandey, Dr. N. Bandyopadhyay, Ms. R. Sripriya. A process of beneficiation of iron ore like materials by treating their slurries with high intensity power ultrasound: Patent no. 249608; 31.10.2011.
14. Aanan H.K., Dr. Shang, Julie Q., Improvement of Total Sulphur Measurement Techniques for Management of Reactive Mine Tailings. *Electronic Thesis and Dissertation Repository*. 2012.

15. V. M. Chakka, B. Altunccevhair, Q. Jin, Y. Li, and J. P. Liu. Surfactant assisted ball milling. *Journal of applied phusycs*. 99. 2006. pp. 99–101.
16. Mahbub Ullah, Md. Edqub Ali. Urfactant-assisted ball milling. *Universiti Malaya*. 2013.

Received 23/04/18

Accepted 14/06/18

Образец для цитирования

Замотин П.А., Лобанов В.Г. Интенсификация процесса измельчения золотосодержащей руды с использованием поверхностно-активных веществ и дополнительной обработкой ультразвуком // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2018. Т.16. №3. С. 25–32. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-25-32>

For citation

Zamotin P.A., Lobanov V.G. Intensification of gold ore grinding process with the help of surfactants and additional ultrasonic. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 3, pp. 25–32. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-25-32>
