

УДК 661.185.8-046.24:537.52

**ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ПРОЦЕССАХ СГУЩЕНИЯ
КОНЦЕНТРАТОВ И РАЗРУШЕНИЯ ФЛОТАЦИОННЫХ ПЕН****¹Коростовенко В.В., ¹Степанов А.Г., ¹Стрекалова Т.А., ¹Галайко А.В., ²Суханова А.В.**¹ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет: Институт цветных металлов
и материаловедения», Красноярск, e-mail: root@gold.sfu-kras.ru;²ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет: Институт космических
и информационных технологий», Красноярск

Исследования по изучению влияния разрядно-импульсной обработки (РИО) как одного из электрофизических методов обработки на процесс сгущения флотационных концентратов проводили с целью определения возможности интенсификации процесса сгущения концентратов и уменьшения удельных площадей сгущения. Разрядно-импульсная обработка полидисперсных сред находит все более широкое применение в технологиях обогащения производства, что обусловлено особенностями динамических процессов при импульсном разряде в многокомпонентных средах. При разрядно-импульсной коагуляции важную роль играет электрическая характеристика минеральной поверхности, одним из показателей которой является электрокинетический потенциал. Формируемый разрядом фронт волны приводит среду в сложное напряженное состояние с активным участием как волн сжатия, так и волн растяжения. Динамика волновых процессов в многокомпонентных средах, соответствующих фазе сжатия, определяется энергетическими параметрами импульса, а на стадии разрежения – параметрами технологической среды: плотностью, удельным содержанием компонентов среды, геометрическими характеристиками технологического узла. Разрядно-импульсная обработка является одним из новых методов интенсификации процесса сгущения концентратов. Измерения на реальной флотационной пульпе перед сгущением показали, что после РИО электрокинетический потенциал существенно снижается, достигая величины значительно ниже предела порога коагуляции (± 30 мВ). Уменьшение значений электрокинетического потенциала после РИО позволяет сделать вывод об улучшении процесса коагуляции минеральных частиц и изменении электрических свойств поверхности частиц. Сгущение концентратов можно интенсифицировать разрядно-импульсными методами, позволяющими увеличить скорость осаждения сгущаемых частиц с 0,25 до 25 см/мин., сократить требуемое до чистоты слива время с 40 до 10 мин., обеспечив при этом более плотный осадок; потери твердой фазы со сливом сгустителя снижаются с 20 до 0,8 г на 1 л слива. Следует также отметить, что слив сгустителей содержит значительно меньшие концентрации тяжелых металлов, а жидкая фаза пульпы пригодна для использования в замкнутом водообороте.

Ключевые слова: флотация, сгущение концентратов, разрядно-импульсный метод**ELECTROPHYSICAL METHODS IN THE PROCESSES OF CONCENTRATES
INSPISSATION AND FROTH DESTRUCTION****¹Korostovenko V.V., ¹Stepanov A.G., ¹Strekalova T.A., ¹Galaiko A.V., ²Sukhanova A.V.**¹*Siberian Federal University: Institute of Non-Ferrous Metals and Materials,
Krasnoyarsk, e-mail: root@gold.sfu-kras.ru;*²*Siberian Federal University: Institute of Space and Information Technologies, Krasnoyarsk*

A range of researches, dedicated to discovering how discharge-impulse processing (DIP) affects the process of flotation concentrates inspissation, were conducted. Defining a possibility to intensify the aforementioned process and decrease specific collection areas of inspissation were the goal. Discharge-impulse processing of polydisperse medium keeps finding broader application in technologies of enrichment development. It is justified by the features of dynamic processing within impulse discharge in multicomponent medium. Within discharge-impulse coagulation, electrical characteristic of mineral surface is significant. Electrokinetic potential is one of its indices. Formed by a discharge wavefront, it brings the medium into complicated tense state with an active participation of both compressive and dilatational waves. The dynamics of wave processes in multicomponent medium, corresponding to the compression phase, is defined with energetic impulse parameters. In a dilation phase – with parameters of technological medium – density and geometrical characteristics of a technological node. Discharge-impulse processing is one of the newest methods for intensifying the process of concentrates inspissation. Measurements, used on a real floatation pulp before inspissation, has shown that DIP led to a significant decrease of electrokinetic potential, letting it reach the value that's well below the coagulation limit (± 30 mv). The decrease of values of electrokinetic potential after DIP allows to conclude an improvement of mineral particles coagulation process and a change of electrical features of aggregate surface of particles. An inspissation of concentrates can be intensified with discharge-impulse methods, letting the increase of subsidence velocity of concentrated particles from 0,25 to 25 sm/min, providing with denser deposit; the losses of solid phase with a condensate discharge decrease from 20 to 0,8 g per 1 l of discharge. It is worth emphasizing that the discharge contents significantly lower heavy metals concentrates, and the liquid phase of a pulp is applicable for closed water rotation.

Keywords: flotation, condensate inspissation, discharge-impulse methods

Реализация на практике новых технологий повышения извлечения ценных компонентов из обогащаемого сырья [1; 2], а также совершенствование методов осветления технологической воды от тонких

породных частиц открывают широкие перспективы применению специальных способов обработки водных дисперсных систем: магнитными, ультразвуковыми полями, гидротермальной и термической нейтронной

обработкой. Большие возможности в этом направлении открываются при использовании электрофизических методов [3; 4], в том числе импульсных полей взрывного типа [5]. Важнейшей проблемой является также очистка флотационных стоков от минеральных примесей как с целью доизвлечения полезных компонентов, так и в целях организации эффективного водооборота. Наряду с этим имеют место значительные потери полезных компонентов со сливом сгустителей обогатительных фабрик и с промышленными стоками других производств по переработке минерального сырья.

Цель исследования: исследования по изучению влияния разрядно-импульсной обработки на процесс сгущения флотационных концентратов проводили, во-первых, с целью определения возможности интенсификации процесса сгущения концентратов и уменьшения удельных площадей сгущения, во-вторых – для снижения загрязнения хвостов сгущения тяжелыми металлами.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились на флотационной пульпе свинцово-цинковых руд Зыряновского, Горевского, Токобского и Жайремского месторождений перед сгущением. После обработки флотационных концентратов изучали процесс осаждения минеральных частиц и исследовали слив на содержание твердого. Исследования по сгущению концентратов проводятся на продуктах обогащения пробы, содержащей до 75 % класса – 0,074 мм, РИО концентратов производится в реакторе со стальными электродами. В каждом опыте исследуется объем пульпы 1 л при содержании твердого 20 %. Изучение кинетики сгущения проводится в цилиндрах с емкостью 1 л по перемещению границы раздела твердой и жидкой фазы во времени.

Для разрядно-импульсной обработки концентратов с целью разрушения флотационной пены применялся реактор со стальными электродами. Энергия обработки варьировалась широким диапазоне: от 0,5 до 100 кДж/дм³. Концентраты, содержащие 20 % твердого, после разрядно-импульсной обработки сливаются в мерные стеклянные цилиндры. В качестве исходных продуктов использовались руды Горевского месторождения различной степени измельчения (время измельчения составляло 40 и 60 минут). Рудные минералы в исходной пробе представлены галенитом, сфалеритом, пиритом, пирротинном и халь-

копиритом, причем галенит является преобладающим главным рудным минералом. По результатам химического анализа проба содержит свинца – 2,5-3,0 %, цинка – 0,5 %, что в пересчете на минеральный состав соответствует 3,4 % галенита и 0,74 % сфалерита. Сфалерит в зернах содержит включения халькопирита и сростки галенита. Главные нерудные минералы в пробе представлены карбонатами (доломит, кальцит, сидерит) и кварцем, второстепенные – хлоритом, мусковитом, серицитом, эпидотом, полевыми шпатами. Трудность раскрытия сростков определяется тем, что включения рудных очень тонкие, часто с неправильными извилистыми границами срастания с нерудными минералами и между собой; размеры включений галенита в нерудных – 0,09-0,045 мм, пирита и пирротина – 0,09-0,13.

Влияние РИО на разрушаемость флотационных пен оценивалось по высоте пенного слоя с точностью до $\pm 0,5$ мм. Содержание твердой фазы в пенном продукте определялось весовым методом с точностью до $\pm 0,0005$ г. Исследования проводились в 3^х параллелях, при этом расхождение результатов не должно превышать 10 %.

Результаты исследования и их обсуждение

В процессе исследования динамических процессов в водных дисперсиях минералов (условий возникновения прямых и отраженных волн сжатия, длительности фаз сжатия и растяжения, временных интервалов следования ударных волн) нами установлено, что суммарная полезная работа волн в фазе сжатия составляет примерно 53 % от общей работы ударных волн, при этом около 47 % общей полезной работы выполняют отраженные волны, а основные волновые процессы завершаются через 50 мкс. Поскольку максимальное давление на фронте волны зависит от вводимой в канал разряда энергии, оценка этой зависимости представляет особый интерес. Как видно из рис. 1, максимум давления первого пика (P_{m1}) нелинейно возрастает с увеличением энергии разряда, а величина максимума давления второго пика (P_{m2}) стабилизируется при энергиях более 10 кДж (рис. 1). Давление в прямой (P_{m1}) и отраженной (P_{m2}) волнах на фронте связаны соотношением $P_{m2} = 0,65 P_{m1}$, а за фронтом волн – $P_{m2} = 0,5 P_{m12}$, что свидетельствует о значительных потенциальных возможностях отраженных волн для интенсификации разрядно-импульсной фрагментации твердой фазы.

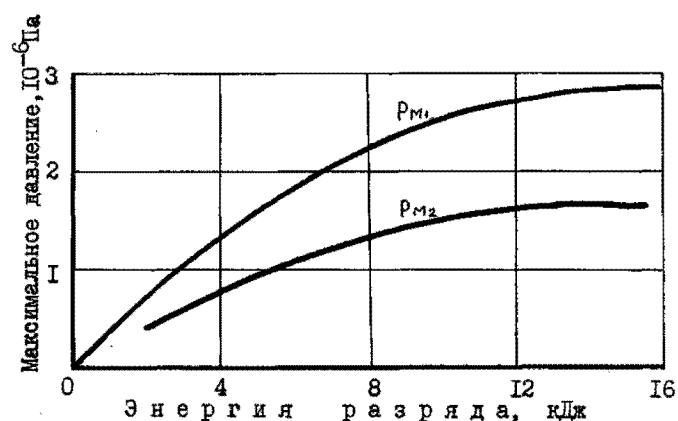


Рис. 1. Влияние энергии разряда на максимальное давление на фронте прямой и отраженной волн

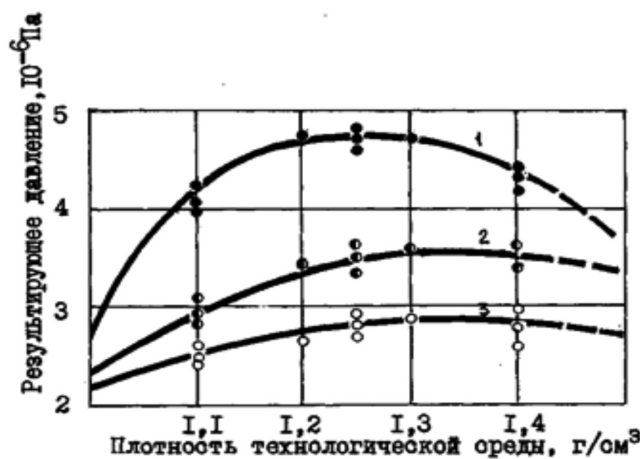


Рис. 2. Зависимость результирующего давления на фронте волны от плотности среды при различных относительных расстояниях: 1- $R/R_0 = 10,4$; 2- $R/R_0 = 15$; 3 - $R/R_0 = 17$

Исследование влияния плотности трехкомпонентной среды на результирующее давление показало (рис. 2), что с увеличением плотности до $\rho = 1,26 \text{ г/см}^3$, что соответствует плотности пульпы Т:Ж = 1:3, наблюдается увеличение давления ударной волны, а далее давление начинает падать. Следовательно, практическое использование ударных волн в трехкомпонентных средах при импульсном электроразряде наиболее эффективно при плотности трехкомпонентной среды (вода, воздух, твердые составляющие) $1,26 \text{ г/см}^3$. Необходимо учитывать, что существует также зависимость давления на фронте ударной волны от относительного расстояния от центра импульса; если расстояние между электродами обозначить R_0 , а текущий радиус R , то можно определить оптимальную область R/R_0 [6].

Как известно, флотационные пены состоят из пузырьков воздуха, разграниченных прослойками воды, и минеральных частиц, прилипших к поверхности этих пузырьков. Данные табл. 1 показывают, что РИО позволяет существенно снизить потери твердого продукта со сливом. Так, при обработке оптимальной энергией ($9,2 \text{ кДж/дм}^3$) выход твердого со сливом уменьшается с 35 мг/л (без обработки) до $1-2 \text{ мг/л}$.

Результаты наблюдений кинетики осаждения коллективного свинцово-цинкового концентрата приведены в табл. 2.

Анализ табл. 2 позволяет сделать вывод, что оптимальной энергией обработки концентратов перед сгущением является удельная энергия $9,2 \text{ кДж/дм}^3$. При этой энергии обработки скорость осаждения частиц возрастает в десятки раз – с $0,25$ до 25 см/мин .

Таблица 1

Зависимость содержания твердого продукта в сливе от энергии РИО

Удельная энергия разряда, кДж/дм ³	0	3,4	6,0	8,6	9,2	11,2	13,4	16,5
Выход твердого продукта в осветленном растворе, мг/дм ³	35	8	5	0,9	1	4,6	10	15

Таблица 2

Изменение высоты осветленного слоя в зависимости от энергии РИО при сгущении свинцово-цинковых концентратов

Время осаждения, мин.	Высота осветленного слоя над сгущенным продуктом (мм) при различной энергии РИО (кДж/дм ³)						
	без обработки	1,5	3,4	6	9,2	13,4	18,2
0	0	0	0	0	0	0	0
2	5	5	5	15	50	10	10
4	42	35	55	60	130	50	45
6	90	80	130	105	170	120	115
8	130	120	165	150	245	160	115
10	170	160	210	190	320	190	185
12	200	200	260	230		230	230
14	240	245	280	280		280	285
16	280	285	300	320		310	315
20	310	320	320			320	320
30	315						
40	320						

Примечание: при полном сгущении концентрата высота осветленного слоя над ним равна 320 мм.

Флотационная пена должна обладать способностью устойчиво удерживать всплывающие с пузырьками частицы флотируемых минералов и не разрушаться до момента удаления из флотационной камеры. Минеральные частицы, достаточно прочно удерживающиеся в нем, значительно повышают ее устойчивость.

Устойчивость флотационной пены зависит главным образом от природы и концентрации реагентов-пенообразователей, которые, изменяя строение и состав адсорбционных слоев на поверхности пузырьков и характер минерального покрытия этой поверхности, оказывают на пену стабилизирующее воздействие.

В практике флотационного обогащения такие устойчивые пены часто переливаются через борта желобов флотационных машин и сгустителей, плохо перекачиваются насосами и фильтруются, при этом увеличиваются потери металлов со сливами сгустителей. Реагентный режим, обеспечивающий одновременно высокую эффективность процесса флотации и получение легко разрушающейся пены, не всегда удается подобрать, в связи с чем для разрушения флотационной пены часто применяются механические

и физико-химические способы: применение вибрирующих желобов, вакуумных пеногасителей, воздействие сильной струи воды. Однако эти методы далеко не всегда эффективны, кроме того, использование для пеногашения сильной струи воды приводит к нежелательному обводнению продуктов перед обезвоживанием и перегрузке сгустителей. Для разрушения пен известно применение различных типов насосов, ультразвуковых статических сирен и излучателей. Однако названные методы мало эффективны, и полное разрушение флотационных пен с их помощью не достигается.

Одним из новых физических методов пеногашения является разрядно-импульсная обработка, при которой достигается полное разрушение флотационной пены при минимальных затратах электроэнергии.

Соответствующие исследования нами приведены при сгущении коллективного свинцово-цинкового концентрата, содержащего 20% твердой фазы.

Сгущение концентратов, содержащих до 15% свинца в виде галенита, сопровождается образованием рыхлой и устойчивой флотационной пены, не разрушающейся в течение длительного времени (14-16 ча-

сов); в условиях опыта высота пенного слоя составляла 20-40 мм. При этом содержание минеральных частиц в пенном продукте составляет до 20 г/л. Следовательно, при сгущении концентратов возможны большие потери металлов со сливами сгустителей при последующем их обезвоживании.

Разрядно-импульсная обработка флотационных пен позволяет получить более высокие качественные и количественные показатели процесса. На рис. 1 показана зависимость высоты слоя пены и массы твердого в ней от удельной энергии обработки. Анализ графиков позволяет сделать вывод, что оптимальной областью энергий для эффективного разрушения флотационных пен является область 1,5-3,4 кДж/дм³. Для концентратов с исходным временем измельчения 40 мин. оптимальной является энергия

разряда 1,5 кДж/дм³, а с исходным временем измельчения 60 мин. – 3,4 кДж/дм³.

Разрядно-импульсная обработка флотационной пены снижает до минимума потери металлов со сливом; экспериментально установлено (рис. 4), что потери твердого со сливом при отсутствии РИО составляют около 20, а после обработки – не более 0,8 г в 1 л слива.

Химический анализ твердого продукта показал, что в нем содержится 46,1% Pb и 3,2% Zn. В пересчете на фабрику средней производительности (5000 т/сут.) при выходе коллективного концентрата, равного 5%, количество слива составляет 600 м³/сут., а потери со сливом – 1,2 т, в том числе потери свинца – 0,55, а цинка – 0,038 т/сут. При этом существенно снижается качество получаемого концентрата (с 15 до 6%).

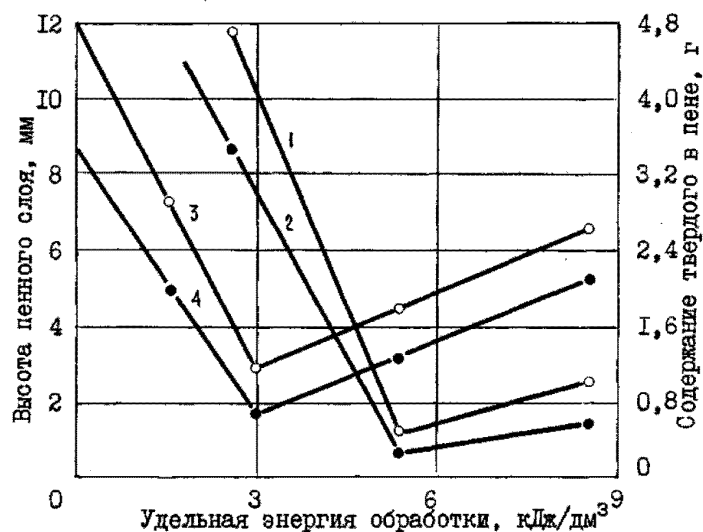


Рис. 3. Характеристики пенного слоя после обработки: 1, 3 – высота слоя пены; 2, 4 – масса твердого в пене; 1, 2 и 3, 4 – время измельчения исходной руды 60 и 40 мин. соответственно

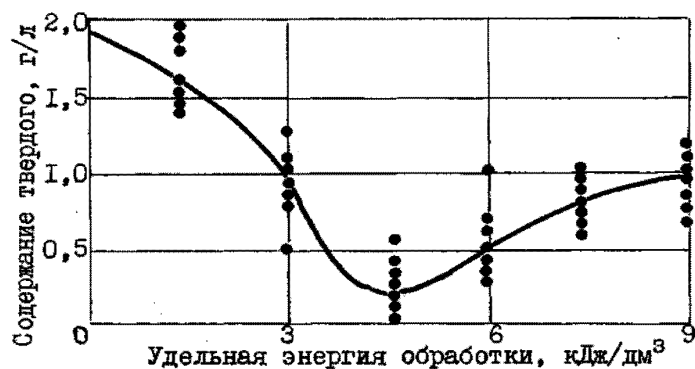


Рис. 4. Зависимость содержания твердого в сливе от энергии разрядно-импульсной обработки

Заключение

Разрядно-импульсная обработка снижает до минимума потери металлов со сливом сгустителей. Флотационная пена при оптимальных энергиях полностью разрушается. Объяснение этому явлению вытекает из сущности процесса формирования фронта ударных волн, кавитации и термоупругих напряжений в обрабатываемой жидкости при разрядно-импульсном воздействии. Следует также отметить существенное снижение загрязнения хвостов обогащения, складываемых в хвостохранилище, тяжелыми металлами, а жидкая фаза отходов подготовлена к использованию в системах замкнутого водооборота.

Список литературы / References

1. Зубков А.А., Шуленина З.М., Подзноев Г.П. Повышение извлечения ценных компонентов и комплексности использования руд природных и техногенных месторождений на основе нового подхода к технологии их переработки // Вестник РУДН. Серия Инженерные исследования. 2007. № 2. С. 56–63.
Zubkov A.A., Shulenina Z.M., Podzniov G.P. The increase of valued components extration and complexity of application of ores from nature and technogenic deposits, based on a new aproach for a technology of their processing // Vestnik RUDN. Seriya Inzhenernyye issledovaniya. 2007. № 2. P. 56–63 (in Russian).
2. Чантурья В.А. Прогрессивные методы обогащения и комплексной переработки минерального сырья. Выступление на Первом национальном горнопромышленном форуме 27.11.2014. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=0OyRHqLd7MU> (дата обращения: 27.11.2021).
Chanturya V.A. Progressive methods of enrichment and complex processing of mineral raw materials. Performance at the First National Mining Forum 27.11.2014. [Electronic resource]. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=0OyRHqLd7MU> (date accessed: 27.11.2021) (in Russian).
3. Чантурья В.А. Электрохимическая технология в процессах первичной переработки минерального сырья // Сб. Новые процессы в комбинированных схемах обогащения полезных ископаемых. М.: Наука, 1989. С. 119–127.
Chanturya V.A. Electrochemical technology in processes of primary mineral raw material processing. // Sb. Novye processy v kombinirovannyh shemah obogascheniya poleznyh iskopaemyh. M.: Nauka, 1989. P. 119–127 (in Russian).
4. Воронова О.В., Киенко Л.А. Применение ультразвуковых воздействий при флотации техногенного сырья с целью повышения качества концентрата // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы XXV Международной научно-практической конференции (г. Екатеринбург, 07-10 апреля 2020 г.). Екатеринбург: Изд-во «Форт Диалог – Исеть», 2020. С. 283–286.
Voronova O.V., Kienko L.A. An implementation of ultrasonic impacts within flotation of technogenic raw materials with the aim of increasing a concentrate quality. Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogennoy syrya: XXV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya materials (Yekaterinburg, 7-10th April 2020 g.). Yekaterinburg: Fort Dialog-Iset, 2020. P. 283–286 (in Russian).
5. Коростовенко В.В., Суханова А.В. Использование системного анализа для оценки возможности применения разрядно-импульсных методов в технологиях освоения минеральных ресурсов // Успехи современного естествознания. 2017. № 11. С. 73–77.
Korostovenko V.V., Sukhanova A.V. An implementation of system analysis for estimating the possibility of discharge-impulse methods application in technologies of mineral resources mastering // Uspehi Sovremennogo Estestvoznaniya. 2017. № 11. P. 73–77 (in Russian).
6. Коростовенко В.В., Шахрай С.Г., Степанов А.Г., Ворошилова М.В. Способ обогащения руд цветных металлов // Патент РФ № 2514351. Патентообладатель ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет. 2014. Бюл. № 12.
Korostovenko V.V., Shakhrai S.G., Stepanov A.G., Voroshilova M.V. Method of enrichment of non-ferrous metal ores // Patent RF № 2514351. Patentoobladatel' FGAOU VPO «Sibirskiy federal'nyy universitet. 2014. Byul. № 12 (in Russian).