

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ К. И. САТПАЕВА

ИНСТИТУТ МЕТАЛЛУРГИИ И ОБОГАЩЕНИЯ

МАТЕРИАЛЫ

Международной научно-практической конференции
ЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЦВЕТНЫХ,
РЕДКИХ И БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ



Алматы 2018 Almaty

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ К. И. САТПАЕВА
ИНСТИТУТ МЕТАЛЛУРГИИ И ОБОГАЩЕНИЯ**

**Металлургия ғылымы мен өнеркәсібінің мәселелеріне және белгілі
ғалым металлург, ҚР ҰҒА корреспондент мүшесі,
Қазақстан Республикасы Мемлекеттік сыйлығының иегері
Болат Балтақайұлы Бейсембаевті еске алуға арналған
«Түсті, сирек және асыл металдарды өндірудің тиімді технологиялары»
атты Халықаралық ғылыми-практикалық конференцияның**

МАТЕРИАЛДАРЫ

МАТЕРИАЛЫ

**Международной научно-практической конференции
«Эффективные технологии производства цветных, редких и
благородных металлов», посвященной проблемам металлургической
науки и промышленности и памяти известного ученого-металлурга,
члена-корреспондента Академии наук РК,
лауреата Государственной премии Республики Казахстан
Булата Балтакаевича Бейсембаева**

PROCEEDINGS

**of International scientific and practical conference
“The Effective Technologies of Non-Ferrous,
Rare and Precious Metals Manufacturing” devoted to the metallurgy
science and industry concerns and in memory of well-known scientist
of metallurgy, Associate Member of the National Academy
of Sciences of Kazakhstan, the honoree of the State Prize of the
Republic of Kazakhstan Bulat Baltakayevich Beisembayev**

Алматы 2018

УДК 669
ББК 34.3
Э94

Ответственный редактор: д.т.н., проф. Кенжалиев Б.К.

Жауапты редактор: т.ғ.д., проф. Кенжалиев Б.К.

Редакционный совет: д.т.н., проф. Кенжалиев Б.К., д.т.н., проф. Загородняя А.Н., д.т.н. Квятковский С.А., к.т.н. Кульдеев Е.И., к.х.н. Темирова С.С., PhD Касымова Г.К.

Редакциялық алқа: т.ғ.д., проф. Кенжалиев Б.К., т.ғ.д., проф. Загородняя А.Н., т.ғ.д. Квятковский С.А., т.ғ.к. Көлдеев Е.И., х.ғ.к. Темирова С.С., PhD Касымова Г.К.

«Эффективные технологии производства цветных, редких и благородных металлов»: Материалы Межд. научно-практ. конф. / Сост.: к.х.н. Темирова С.С., к.т.н. Кульдеев Е.И., Садыкова Т.С. – Алматы, 2018. – 440 с.

«Түсті, сирек және асыл металдарды өндірудің тиімді технологиялары»: Халықар. ғыл. практ. конф. материалдары / Құраст.: х.ғ.к. Темирова С.С., т.ғ.к. Көлдеев Е.И., Садыкова Т.С. – Алматы, 2018. – 440 б.

ISBN 978-601-323-132-7

В Материалах конференции «Эффективные технологии производства цветных, редких и благородных металлов» представлены результаты фундаментальных и прикладных исследований в области металлургии цветных, редких и благородных металлов, обогащения минерального и техногенного сырья, получения высокочистых металлов и перспективных материалов, а также разработки новых и усовершенствования существующих технологических схем, процессов и аппаратов.

Материалы конференции предназначены для ученых и специалистов, работающих в области переработки минерального сырья и материаловедения.

«Түсті, сирек және асыл металдарды өндірудің тиімді технологиялары» атты конференцияның материалдарында түсті, сирек және асыл металдар металлургиясы, минералдық және техногенді шикізаттарды байыту, тазалығы жоғары металдар мен келешегі зор материалдарды алу, сонымен қатар жаңа технологиялық схемаларды, үрдістерді және аппараттарды жасап шығару және олардың бұрыннан келе жатқан түрлерін жетілдіру салаларындағы іргелі және қолданбалы зерттеулердің нәтижелері келтірілген.

Конференция материалдары материалтану және минералды шикізаттарды өңдеу саласында жұмыс жасайтын ғалымдар мен мамандарға арналған.

УДК 669
ББК 34.3

ISBN 978-601-323-132-7

© АО «ИМиО», 2018

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПЕННОЙ И ЭЛЕКТРОПЕННОЙ ФЛОТОКЛАССИФИКАЦИИ

<https://doi.org/10.31643/2018-7.52>

***Морозов Ю.П., Бекчурина Е.А.**

ORCID: 0000-0003-0554-5176 0000-0001-7304-2824

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»,
Екатеринбург, Россия, *tails2002@inbox.ru

Аннотация. *Рассмотрены особенности и преимущества работы флотоклассификаторов в режиме пенной сепарации перед пенной флотацией. Исследованы закономерности электропенной сепарации, в частности изучены кинетика флотации, влияние электролизных газов на дисперсность пены, кинетика пенообразования. Установлено влияние на технологические показатели разделения минералов в аппаратах в режиме электропенной сепарации силы тока, отдельного использования электролизных кислорода и водорода. В целом, показано, что режим электропенной сепарации обеспечивает более высокие показатели обогащения по сравнению с режимом пенной сепарации.*

Процесс флотоклассификации, при котором в одном аппарате объединены процессы флотации и гидравлической классификации, хорошо зарекомендовал себя при проведении лабораторных и промышленных испытаний на ряде фабрик Урала и Китая [1]. Наиболее эффективной является флотоклассификация в аппаратах чанового типа, устанавливаемых в замкнутом цикле измельчения. При этом во флотоклассификаторе могут быть реализованы различные методы флотационного обогащения. Так, исходное питание во флотоклассификатор может подаваться внутрь камеры как при пенной флотации, а также в подпенный слой или непосредственно на пену как при пенной сепарации.

Метод пенной сепарации, имея общие с флотацией физико-химические основы, отличается от последней более благоприятными гидродинамическими условиями в зоне образования флотационных комплексов и вследствие этого обладает существенными преимуществами, которые свидетельствуют о целесообразности дальнейшего совершенствования и применения этого метода [2].

В условиях пенной сепарации подача потока материала на слой подготовленной двухфазной пены гарантирует высокую вероятность встречи каждой твердой частицы с несколькими пузырьками. Кроме того, в пенном слое уменьшается в десятки раз сила отрыва частиц от пузырьков вследствие отсутствия гидродинамического перемешивания материала [2]. В результате этого при пенной сепарации время движения минеральных частиц до момента возникновения флотокомплексов составляет 2-4 с.

Особенностью пенной сепарации является падение извлечения и повышение массовой доли полезного минерала в пенном продукте с увеличением продолжительности пребывания материала в пенном слое [2]. Физической причиной снижения извлечения во времени при пенной сепарации служит явление старения пены и выпадения некоторой части гидрофобного материала в камерный продукт. Важной характеристикой кинетики пенной сепарации является постоянство процента извлечения гидрофобного материала из единицы объема пульпы при последовательных операциях пенной сепарации.

Большую роль в процессе пенной сепарации играет подпенный слой, который представляет собой жидкость, насыщенную воздушными пузырьками [2]. Воздушные пузырьки этого подпенного слоя, вступая в контакт с падающими гидрофобными частицами, способствуют выносу их в пену.

Для создания достаточно устойчивого и прочного пенного слоя вся жидкая фаза, поступающая в процесс пенной сепарации как с исходной пульпой, так и в виде чистой или оборотной воды, должна предварительно обрабатываться пенообразователем. При пенной сепарации возможно извлечение из пульпы гидрофобных частиц практически при любом разбавлении [2, 3].

Таким образом, преимуществами пенной сепарации перед флотацией являются низкие капитальные и энергетические затраты и малая продолжительность процесса, высокая эффективность разделения крупнозернистого материала, сильно разбавленных и плотных пульп.

Обозначенные преимущества позволяют сделать вывод, что и при реализации процесса флотоклассификации режим пенной сепарации является наиболее предпочтительным, поскольку при работе флотоклассификатора в замкнутом цикле измельчения крупность подаваемого в него материала может достигать 10 мм.

Экспериментально процесс флотоклассификации исследован в лабораторном флотоклассификаторе с объемом камеры 15 л, в котором предусмотрена возможность реализации режима подачи исходного питания в камеру флотоклассификатора над диспергаторами, в подпенный слой и режим пенной сепарации. Исследования флотоклассификации выполнены на измельченной пробе хвостов Жезказганской обогатительной фабрики (ЖОФ) с массовой долей меди 0,11 %. В ходе экспериментов давление воздуха на входе во флотоклассификатор составляло 0,1 и 0,2 МПа. В результате исследований установлено, что наибольшее извлечение меди в пенный продукт флотоклассификации достигается в режиме пенной сепарации. При давлении воздуха 0,2 МПа получен пенный продукт с массовой долей меди 0,35 % при извлечении 73,71 %. При этом получен слив с массовой долей меди 0,035 %, который является отвальными хвостами.

Для эффективного разделения минералов пенной сепарацией важным моментом является обеспечение оптимального аэрационного режима. Одним из возможных направлений совершенствования пенной сепарации является использование процессов электрохимической технологии.

В последние годы наиболее широко исследованы вопросы электрохимической обработки водных систем с целью регулирования физико-химических свойств поверхности минералов, химического состояния реагентов, ионного состава и газонасыщения жидкой фазы. Установлено положительное влияние применения электрохимической технологии водоподготовки в схемах обогащения различных видов минерального сырья [4, 5].

Электрохимическая технология в пенной сепарации позволяет воздействовать на процесс пенообразования путем изменения ионного состава пенообразующего раствора и газовыделения при электролизе. Пузырьки электролизных газов принимают активное участие в формировании пены.

Под электропенной сепарацией понимается способ разделения, при котором разделяемый материал подается на пену, сформированную с пузырьками электролизных газов [6]. Электропенная сепарация принципиально отличается от воздушной пенной сепарации и флотации газовым составом пенного слоя, в котором присутствуют относительно крупные пузырьки диспергированного воздуха и мелкие пузырьки электролизных газов.

Закономерности пенообразования при электропенной сепарации исследованы экспериментально. Для изучения кинетики образования пены при подаче смеси пузырьков воздуха и электролизных газов использовалась цилиндрическая электрохимическая ячейка высотой 0,6 м, на дне которой установлен воздушный аэратор из перфорированной резиновой трубки. Над воздушным аэратором установлен электрохимический аэратор, выполненный из сетки нержавеющей стали. Аноды и катоды расположены в чередующемся порядке на расстоянии 5 мм друг от друга. Пенообразование осуществляли в растворе вспенивателя Т-80 при концентрации его

0,03%. Расход воздуха через воздушный аэратор составлял 0,33 см³/с. Расход электролизных газов на пенообразование путем варьирования электрических параметров изменялся в пределах от 0 до 0,28 см³/с. Установлено, что с увеличением расхода электролизных газов скорости образования и разрушения пены возрастают. Максимальный объем пенного слоя при расходах электролизных газов до 10 % от общего расхода газов на пенообразование выше максимального объема пенного слоя из пузырьков воздуха.

Для оценки влияния электролизных газов на дисперсность пены выполнена фотосъемка пен, полученных при различных режимах пенообразования. Установлено, что электролизные газы приводят к существенному увеличению дисперсности пены и снижению коалесценции воздушных пузырьков. При этом наряду с относительно крупными пузырьками в пене присутствуют тонкодисперсные пузырьки с максимальным размером около 0,1 мм.

Для исследований технических возможностей электропенной сепарации разработан и изготовлен ряд аппаратов, обеспечивающих совместное и раздельное использование электролизных кислорода и водорода.

Исследования по совместному использованию электролизных газов выполнены на сульфидной руде, характеризующейся тонкой вкрапленностью сульфидов и их сложным взаимным проращением. Руда содержит 1,5 г/т золота, 20 г/т серебра. Навески руды 0,5 кг измельчали в известковой среде (рН=10,2) в присутствии бутилового ксантогената калия (100 г/т) до 80 % класса крупности минус 0,071 мм и подвергали электропенной сепарации при производительности по пульпе 25 л/ч и массовой доле твердого 20 %.

Опыты спланированы по дробному факторному эксперименту 2⁴⁻¹. Переменными факторами в матрице являлись концентрация ксантогената в растворе, концентрация вспенивателя Т-80 в растворе, сила тока и длина зоны сепарации. Анализ результатов по отдельным функциям отклика показывает, что увеличение концентрации ксантогената и вспенивателя в рабочем растворе приводит к увеличению извлечения в концентрат меди и золота при снижении качества концентрата по меди. Увеличение длины зоны сепарации приводит к повышению качества концентрата и снижению извлечения в него меди и золота. Увеличение силы тока, эквивалентное повышению содержания электролизных газов в пене, приводит к повышению качества и извлечения меди в классе крупности минус 0,059 мм и к повышению извлечения золота в концентрат.

С целью оценки возможностей процесса электропенной сепарации в промышленных условиях разработан полупромышленный электропенный флотоклассификатор, который представляет собой цилиндрический корпус, внутри которого расположены электрохимический и воздушный аэраторы. Электрохимический аэратор состоит из спиралеобразных анода и катода. Electroды выполнены из нержавеющей листовой стали. Воздушный аэратор расположен под электрохимическим и выполнен из перфорированной резиновой трубки. Электрохимический аэратор рассчитан на электрический ток до 500 А, воздушный аэратор – на давление воздуха до 0,5 МПа. В центре корпуса электропенного флотоклассификатора помещена сливная труба, а в донной части корпуса закреплен патрубок для выпуска песков. В верхней части корпуса расположен кольцевой пеносборник и подвижный цилиндрический сливной порог. Максимальная пропускная способность устройства по исходному питанию составляет 5 м³/ч.

Электропенная флотоклассификация испытана на Бурибаевской обогатительной фабрике в цикле основной медной флотации. В процессе испытаний производительность по твердому питанию изменялась в пределах от 0,2 до 1,0 т/ч, давление воздуха – от 0,1 до 0,2 МПа. С помощью подвижного сливного порога толщина пенного слоя изменялась от 5 до 12 см. В режиме электропенной сепарации при напряжении на электродах 50 В электрический ток через электрохимический аэратор изменялся в пределах от 60 до 320 А.

В процессе промышленных испытаний установлено, что в режиме электропенной сепарации устройство позволяет в цикле медной флотации получать кондиционный медный концентрат при производительности по исходному питанию до 0,6 т/ч. В различных режимах процесса выполнено сравнение показателей электропенной (ЭПС) и пенной (ПС) сепараций (таблица 1). Электропенная сепарация по сравнению с пенной приводит к увеличению массовой доли меди в пенном продукте и повышению извлечения в него меди, золота и серебра.

Таблица 1 – Результаты сравнения показателей электропенной (ЭПС) и пенной сепараций (ПС)

Показатели	Значение показателей			
	ЭПС	ПС	ЭПС	ПС
Производительность, т/ч	0,32	0,32	0,68	0,68
Давление воздуха, МПа	0,15	0,15	0,10	0,10
Ток, А	180	0	60	0
Массовая доля меди в исходном питании, %	2,85	3,12	3,04	3,14
Массовая доля меди в концентрате, %	20,87	18,66	14,38	7,70
Извлечение в концентрат, %				
меди	17,73	17,19	40,12	38,39
золота	18,70	12,80	45,40	20,30
серебра	20,80	14,10	44,60	22,40

При производительности электропенного флотоклассификатора 0,50-0,51 т/ч выполнена оценка влияния тока через электрохимический аэратор на показатели электропенной сепарации. Давление воздуха составляло 0,1 МПа, толщина пенного слоя 5 см. Ток изменялся в пределах от 0 до 150 А. В период испытаний массовая доля меди в исходном питании находилась в пределах 1,4-1,8 %. Результаты испытаний приведены на рисунке 1. Более высокие показатели электропенной сепарации достигаются при токе в пределах от 60 до 100 А. Испытания показали высокую эффективность флотоклассификации в режиме электропенной сепарации.

Дальнейшим развитием электропенной сепарации является раздельное использование электролизных кислорода и водорода. Для исследования этого процесса разработан лабораторный диафрагменный электропенный сепаратор. Корпус сепаратора разделен диафрагмой на две камеры, в которых установлены электроды и воздушные аэраторы. Диафрагма выполнена из фильтроткани, электроды – из сетки нержавеющей стали, воздушные аэраторы – из перфорированной резиновой трубки. Сепаратор рассчитан на максимальный ток 20 А и максимальное давление воздуха 0,5 МПа. Он позволяет в одной камере формировать воздушно-кислородную пену, а в другой камере – воздушно-водородную пену.

В диафрагменном электропенном сепараторе исследована кинетика пенообразования в условиях непрерывного выделения пенного продукта [6]. При расходе воздуха через анодную и катодную камеры сепаратора по 0,015 м³/ч получены кинетические зависимости формирования пены из пузырьков воздуха и пузырьков воздуха с пузырьками кислорода в анодной камере и пузырьками водорода в катодной камере. Расход электролизного кислорода составлял 11 % от общего расхода газов на формирование пены, расход электролизного водорода – 25 %.

Кинетические зависимости формирования пены в анодной и катодной камерах электропенного сепаратора приведены на рисунке 2. Влияние электролизных газов на кинетику пенообразования независимо от типа электролизного газа выражается в уменьшении толщины установившегося пенного слоя.

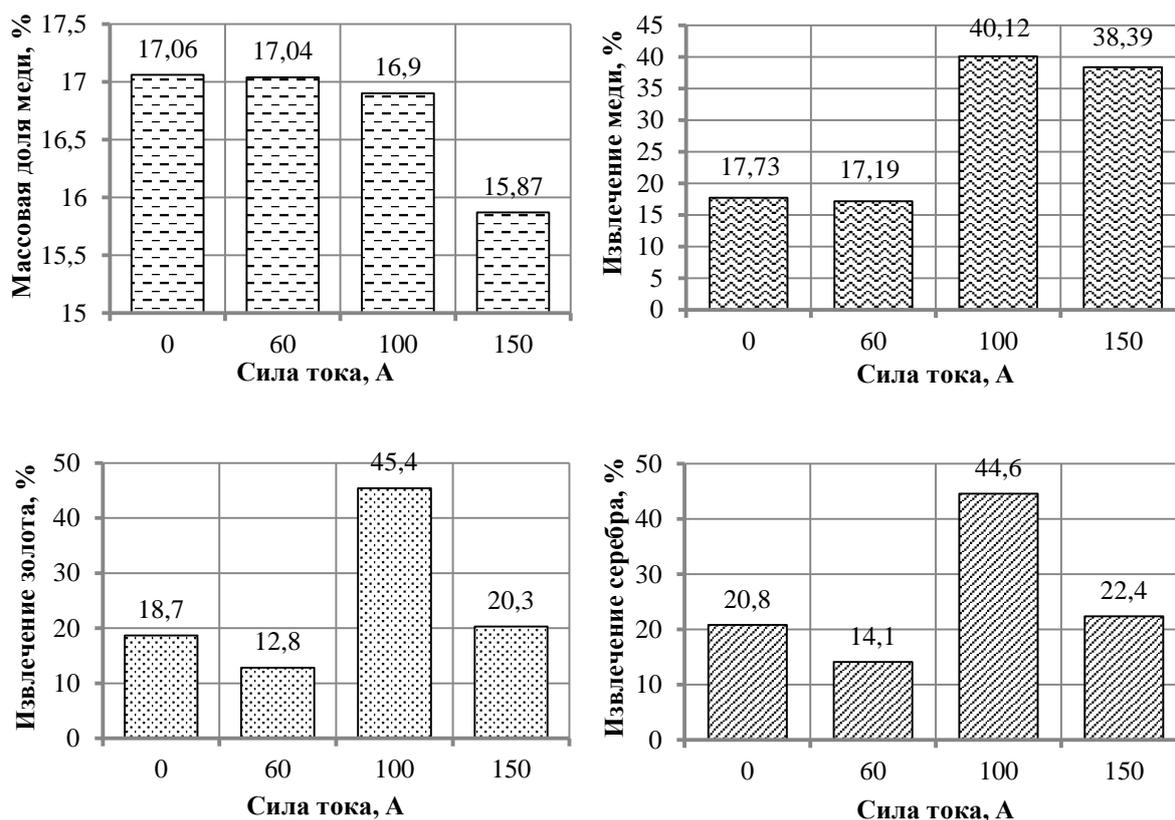


Рисунок 1 – Влияние силы тока на технологические показатели электропенной сепарации

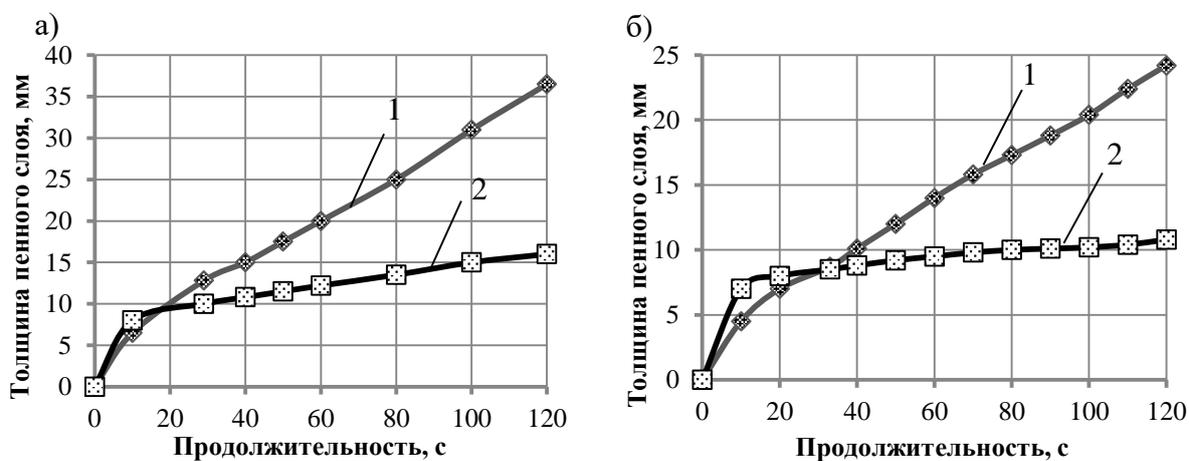


Рисунок 2 – Кинетика формирования пенного слоя в анодной камере (а) и в катодной камере (б) электропенного сепаратора из пузырьков воздуха (1), пузырьков воздуха и электролизных газов (2)

Особенностью электропенной сепарации с отдельным использованием электролизных газов является формирование анолита в анодной камере и католита в катодной камере. Католит и анолит отличаются значением pH. При этом pH жидкой фазы оказывает свое влияние на процессы флотационного разделения и должен быть учтен при электропенной сепарации.

Исследование электропенной сепарации с отдельным использованием электролизных газов выполнено в лабораторных условиях на сульфидных минералах и

на сульфидной руде. Исследованиями на сульфидных минералах установлено, что в анодной камере с увеличением тока выход в пенный продукт всех сульфидных минералов сначала возрастает до определенного предела, после чего снижается. Максимальный выход минералов наблюдается при величине тока 2 А (при объемном содержании пузырьков кислорода в газовой фазе пены 4,8 %). При сепарации в катодной камере для халькопирита и пирита получены зависимости, аналогичные зависимостям, полученным для анодной камеры. Выход сфалерита в катодной камере при увеличении тока снижается. Выход кварца в пенный продукт с увеличением тока в анодной камере повышается, а в катодной – снижается.

При сравнении с результатами пенной сепарации установлено, что электропенная сепарация как в анодной, так и в катодной камере обладает большей, чем пенная сепарация селективностью разделения сульфидных минералов и кварца, а в катодной камере обладает большей, чем пенная сепарация селективностью отделения халькопирита и пирита от сфалерита.

При исследовании электропенной сепарации с отдельным использованием электролизных газов на сульфидной руде эксперименты выполнены следующим образом. Навески руды измельчали в среде извести (рН = 10,2) в присутствии бутилового ксантогената калия (100 г/т) до 80 % класса минус 0,071 мм. После измельчения пробу руды в диафрагменном электропенном сепараторе непрерывно подавали по распределителю потоков в анодную и катодную камеры. Производительность по пульпе составляла 10 л/ч на каждую камеру. Выполнено сравнение показателей пенной и электропенной сепараций (таблица 2). В каждом режиме опыты повторялись три раза.

Таблица 2 – Результаты исследования пенной (ПС) и электропенной (ЭПС) сепараций в анодной и катодной камерах диафрагменного электропенного сепаратора

Показатели, %	Значение показателей в			
	анодной камере		катодной камере	
	ПС	ЭПС	ПС	ЭПС
Массовая доля меди в концентрате	5,88	5,65	5,17	5,81
Извлечение в концентрат				
меди	49,76	53,10	56,75	63,29
золота	38,25	44,15	39,17	51,25
серебра	39,78	46,23	38,81	50,32

Электропенная сепарация как в анодной, так и в катодной камере обеспечивает по сравнению с пенной сепарацией более высокие показатели обогащения. Извлечение меди и благородных металлов в медный концентрат существенно выше. Для попутного извлечения благородных металлов предпочтение может быть отдано электропенной сепарации в катодной камере.

В целом, в результате проведенных исследований изучены закономерности пенной и электропенной сепарации. Установлены преимущества работы флотоклассификаторов в режиме пенной сепарации по сравнению с пенной флотацией. При этом установка в корпусе флотоклассификатора электрохимического аэратора и реализация режима электропенной сепарации способствует существенному повышению извлечения ценных компонентов в пенный продукт.

ЛИТЕРАТУРА

1 Морозов Ю.П. Повышение эффективности флотоклассификации руд и хвостов обогащения / Ю.П. Морозов, Г.Ж. Абдыкирова, Е.А. Бекчурина, С.Б. Дюсенова // Обогащение руд. – 2017. – № 2. – С. 38-43.

2 Малиновский В.А. Пенная сепарация. – Цветные металлы, 1970, № 8, с. 83-86.

3 Матвеевко Н.В. Пенная сепарация полезных ископаемых. – М.: Недра, 1976. С.34-78.

4 Чантурия В. А. Укрупненные испытания электрохимического метода водоподготовки при обогащении тантало-ниобиевых руд / В.А. Чантурия, Е.Л. Чантурия, В.Г. Миненко, А.Л. Самусев // Обогащение руд. – № 3. – 2017. – С. 27-35.

5 Двойченкова Г.П. Развитие теории и совершенствование процессов глубокой переработки кимберлитовых руд сложного вещественного состава на основе электрохимического модифицирования поверхностных свойств алмазов [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 25.00.13 / Двойченкова Галина Петровна. – Москва, 2018. – 42 с.

6 Морозов Ю.П. Теоретическое обоснование и разработка новых методов и аппаратов извлечения тонкодисперсных благородных металлов из руд [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук: 25.00.13 / Морозов Юрий Петрович. – Екатеринбург, 2001. – 397 с.

THE LAWS OF FROTH AND ELECTROFROTH FLOTATION CLASSIFICATION

***Morozov Yu.P., Bekchurina E.A.**

ORCID: 0000-0003-0554-5176 0000-0001-7304-2824

Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia,*tails2002@inbox.ru

Abstract. *Features and advantages of the flotation classifiers work in the froth separation regime are considered. The laws of electrofroth separation have been studied, in particular, kinetics of flotation, the influence of electrolysis gases on the froth dispersion, the kinetics of froth formation. The influence of the current intensity and the separate use of electrolysis oxygen and hydrogen on the technological indices of minerals separation has been established. In general, it has been shown that the electrofroth separation regime provides higher beneficiation indices in comparison with the froth separation regime.*