

УДК 622.765

**НОВЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ УДЕЛЬНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ АЭРАЦИИ
ПРИ ФЛОТАЦИИ**

Т. Н. Александрова, В. В. Кузнецов

*Санкт-Петербургский горный университет,
E-mail: alexandrovat10@gmail.com, valentinvaldimovichkuznetsov@gmail.com,
21 линия, Васильевский остров, 2, 199106, г. Санкт-Петербург, Россия*

Представлен потенциометрический подход к определению характеристического диаметра воздушных пузырьков. Рассматривается возможность определения диаметра воздушных пузырьков по Соутеру на основании значений возникающей разницы электродных потенциалов на разной глубине флотомашины с последующим определением значения удельной интенсивности аэрации. Исследования проводились для двухфазной системы при разных расходах воздуха и вспенивателя. Для установленного наибольшего значения удельной интенсивности аэрации проведены проверочные опыты для трехфазной системы. Установлено, что скорость возрастания возникающей разницы электродных потенциалов линейно коррелирует с диаметром воздушных пузырьков по Соутеру.

Флотация, моделирование, аэрация, диаметр пузырьков по Соутеру, удельная интенсивность аэрации, электродный потенциал

DOI: 10.15372/FTPRPI20220512

Основной тенденцией технологического развития перерабатывающей отрасли является усложнение вещественного и минералогического составов сырья [1, 2]. Тесная ассоциация минералов вмещающей породы и руды значительно затрудняет их разделение на этапе обогащения, что влияет на эффективность дальнейших стадий металлургии и химической переработки сырья [3–5]. Решения по интенсификации и оптимизации существующих процессов разделения, а также создание рациональных способов извлечения ценных компонентов становятся превалирующими направлениями снижения эксплуатационных и капитальных затрат [6–8]. Дополнительным резервом повышения результативности переработки становится совершенствование контроля и автоматизации технологических процессов на основании предлагаемых физико-химических и кинетических моделей [9–11]. Перспективная область внедрения подобных решений — флотационная переработка руд цветных металлов. Гибкость флотационных методов обогащения, состоящая в возможности подбора сочетания реагентного режима, технологических параметров процесса и учитывающая конструктивные особенности аппаратов, решает задачи селективного разделения ценных компонентов и комплексной переработки рудного сырья [12, 13].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (№ 19-17-00096п).

Особое внимание уделяется изучению аэрогидродинамических условий в камере флотации и их влиянию на общую эффективность процесса. Гидродинамический режим и структура потоков флотомашины, определяемые методом аэрирования пульпы, в разной степени зависят от конструктивного оформления камеры и метода диспергирования газовых пузырьков [14, 15]. Принятыми параметрами, характеризующими степень диспергации воздушной фазы в камере флотомашины, являются: объемное содержание газовой фазы в пульпе ε_g , диаметр пузырька по Соутеру d_{32} и относительная скорость подъема пузырьков J_g [16 – 18]. Последние два задают удельную интенсивность аэрации S_b , площадь поверхности газовой фазы в камере флотомашины в единицу времени [19]. Возможен расчет значения параметра удельной интенсивности аэрации по расходу воздуха, диаметру пузырьков воздуха и площади поперечного сечения камеры флотомашины [20]:

$$S_b = \frac{6Q_A \sum_{i=1}^n d_i^2}{A \sum_{i=1}^n d_i^3}, \quad (1)$$

где Q_A — расход воздуха, м³/мин; d_i — диаметр воздушного пузырька, м; A — площадь поперечного сечения камеры флотомашины, м².

В исследованиях флотационного обогащения, как в лабораторных, так и в промышленных условиях, установлена корреляция параметра S_b и константы удельной скорости флотации [21]. Высокая точность в оценке значения удельной интенсивности аэрации необходима для разработки более надежных моделей флотационного процесса, его контроля и автоматизации.

Основная сложность при определении параметра удельной интенсивности аэрации состоит в затруднительной визуальной фиксации размеров пузырьков в процессе экспериментальных исследований флотации [22]. В камерах флотационных машин размер пузырьков газа зависит от широкого спектра параметров [23, 24]. Значение распределения геометрических размеров пузырьков газа обусловлено двумя основными процессами: диспергацией воздуха аэрационным узлом и процессами коалесценции [25]. Широко распространенными приборами для измерения размеров пузырьков являются “UCT bubble size analyser” и “Anglo Platinum Bubble Sizer” [26].

В основе прибора UCT лежит принцип капиллярного отбора пузырьков (рис. 1). Устройство состоит из капиллярного пробоотборника, погруженного в камеру флотомашины. Отобранные пузырьки поднимаются по пробоотборной трубке в резервуар с системой детекторов. Часть пузырьков, которые достигают резервуара, всасываются в капиллярную трубку, где они превращаются в цилиндры, а их длина и скорость измеряются с помощью системы оптических детекторов. Перистальтическим насосом жидкость с захваченной воздушной фазой перекачивается в газовую бюретку, где оценивается степень газонасыщения. Пропорционально полученным параметрам определяются размеры пузырьков как доля от общего объема, захваченного трубкой газа [27, 28].

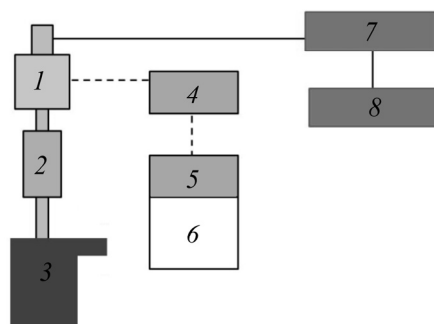


Рис. 1. Принципиальная схема прибора “UCT bubble size analyser” [27]: 1 — система детекторов; 2 — капиллярный пробоотборник; 3 — флотомашина; 4 — блок электроники; 5 — ЭВМ; 6 — обработка данных детектора; 7 — перистальтический насос; 8 — газовая бюретка

Устройство “Anglo Platinum Bubble Sizer” предназначено для визуального метода определения геометрических размеров пузырьков (рис. 2). Оно состоит из пробоотборной трубки, прикрепленной ко дну герметичной смотровой камеры. Пузырьки из пульповой фазы во флотационной камере перемещаются в пробоотборную трубку. Смотровая камера изготовлена из пластика ПВХ с одним окном из армированного стекла. Для обеспечения контрастности изображения используется массив освещения (светодиодные лампы внутри смотровой камеры). Камера наклонена на 15° относительно вертикальной оси симметрии устройства для распределения пузырьков в один слой, чтобы ограничить перекрытие и обеспечить стабильную плоскость фокусировки камеры. Образец пузырьков фотографируется цифровой фотокамерой, а специализированное программное обеспечение для анализа изображений обрабатывает их для получения данных о распределении значений размеров пузырьков [29, 30].



Рис. 2. Устройство “Anglo Platinum Bubble Sizer” [30]

Недостатками данных приборов являются: нарушение гидродинамического режима флотации из-за всасывания объемов пульпы, а также низкая репрезентативность полученных результатов ввиду отбора проб пузырьков в одной точке. Альтернативное решение данной проблемы возможно измерением разницы электродных потенциалов на различной глубине. В [31, 32] обосновано существование поверхностного заряда у воздушных пузырьков в процессе флотации. Значение заряда обусловлено как действием вспенивателя, присутствием в пульпе различных химических соединений, так и размером пузырьков. Направленное движение пузырьков с заряженной поверхностью будет создавать электрическое поле с градиентом потенциала. Установлено, что возникающая разность потенциала при отсутствии изменений химического состава среды будет пропорциональна объемной доле газовой фазы между электродами [33, 34]. Однако данные исследования проводились в реакторе идеального вытеснения, что не соотносится с условиями флотации в пневмомеханической флотомашине.

Цель работы — установление зависимости между возникающей разностью фиксируемых электродных потенциалов на разной глубине пневмомеханической флотомшины и значением диаметра воздушных пузырьков.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На основании предположения о минимальной деформации воздушного пузырька в процессе флотации исследования проводились для двухфазной системы “вода – воздух”. В работе использована пневмомеханическая флотомашинка JK Batch Flotation Test Cell. Машина оснащена

пальцевым импеллером с нижним приводом и статором. Объем камеры флотомашины составлял 1.5 л. Получены исходные данные для моделирования процесса флотационного обогащения в программном пакете JK SimFloat.

Потенциометрический подход к определению параметров воздушной фазы. В ходе экспериментальных исследований измерение разности электродных потенциалов и получение изображений для дальнейшего определения геометрических размеров пузырьков проводилось одновременно. Варьируемые факторы: расход воздуха и концентрация вспенивателя. В качестве вспенивателя использовался 4-метил-2-пентанол или метилизобутилкарбинол (МИБК). Расход воздуха изменялся в пределах 0.8–2.0 л/мин. Исследуемые значения концентрации вспенивателя составили $1.997 \cdot 10^{-5}$, $3.994 \cdot 10^{-4}$ и $5.990 \cdot 10^{-4}$ моль/л. В перерасчете на условия реальной флотации с содержанием твердого в пульпе 30 % данные концентрации соответствуют расходам вспенивателя равным 15, 30 и 45 г/т соответственно.

Анализ процесса диспергации воздушной среды в жидкости проводился на протяжении 700 с. Исследуемый процесс разбивался на два временных интервала. На первом интервале жидкость перемешивалась со скоростью вращения импеллера равной 900 об/мин, на втором — происходила аэрация жидкости в камере с заданным расходом воздуха и продолжающимся перемешиванием среды. Первый временной интервал обозначался как участок стабилизации, второй — участок аэрации. Границей разделения временных этапов являлась отметка в 400 с, когда начиналась подача воздуха в камеру флотомашины. Реагент-вспениватель подавался на временной отметке 370 с.

Возникающая разница электродных потенциалов исследовалась при помощи двух хлорсеребряных электродов (рис. 3), расположенных относительно друг друга на высоте 5 см в камере флотомашины. Расстояние от нижнего электрода до верхней кромки импеллера составило 1 см. В режиме реального времени сигнал от электродов поступал на интерфейс получения электрохимических данных “EMF-16 Precision Electrochemistry EMF Interface” и затем обрабатывался в программном пакете “EMF suite” компании “Lawson Labs”.

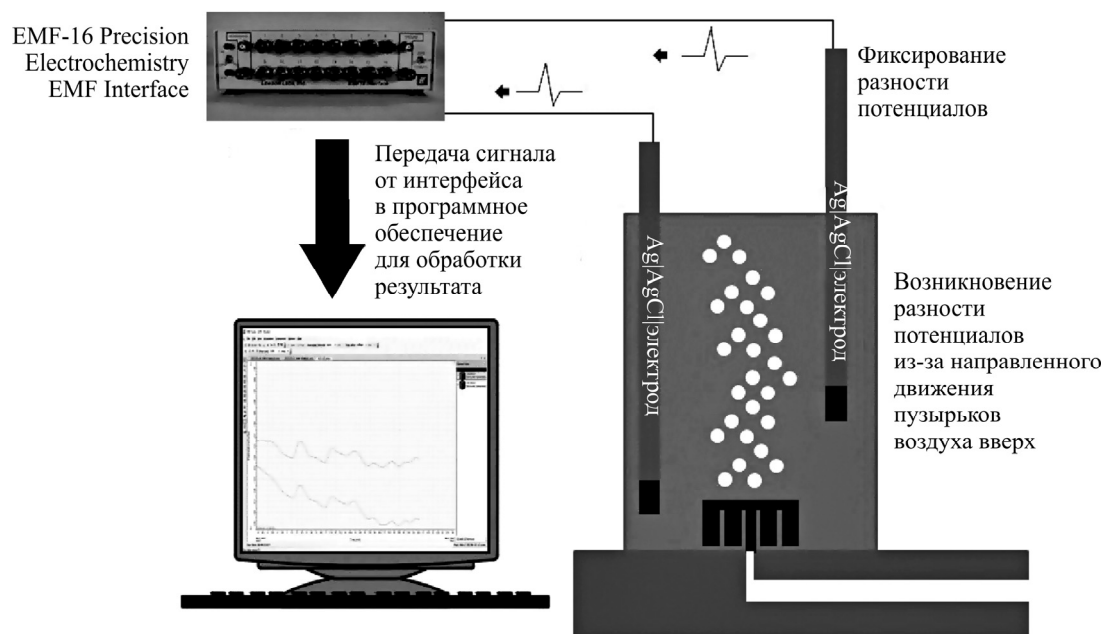


Рис. 3. Алгоритм потенциометрического подхода к определению размеров воздушных пузырьков

Разность электродных потенциалов определялась по формуле

$$\Delta E = E_1 - E_2, \quad (2)$$

где E_1 — электродный потенциал верхнего электрода, мВ; E_2 — электродный потенциал нижнего электрода, мВ.

Моментальное значение разности потенциалов протекания будет зависеть от множества факторов, связанных с реагентным режимом, точностью калибровки электродов и т. д. Однако параметры функциональной зависимости изменения потенциала при аэрации будут адекватно отражать меру диспергации воздушной фазы в камере флотомашины.

Визуальное определение геометрических размеров воздушных пузырьков осуществлялось фотографическим методом (рис. 4). Фотофиксация проводилась через смотровое окно. Полученные изображения обрабатывались в программном пакете “DG Analyzer 1.5” с применением двуградационного метода. Исходные изображения преобразовывались в черно-белые, где воздушные пузырьки, отражающие свет, фиксировались как белые области. Геометрические параметры данных областей рассчитывались при помощи программы с результатом в виде значений эквивалентных диаметров каждой области. Для устранения ложнодетектируемых объектов применялась заливка замкнутых областей. Предложенный подход позволил определить количество и размеры пузырьков в рассматриваемой области. Однако обнаружен ряд трудностей, в частности, могут встретиться ошибки обнаружения при наложении пузырьков друг на друга. Для повышения качества распознавания геометрических размеров пузырьков камера флотомашины подсвечивалась от источника рассеянного света. Снимающая камера устанавливалась в непосредственной близости к камере флотомашины. Анализировался фрагмент из центральной области снимка.

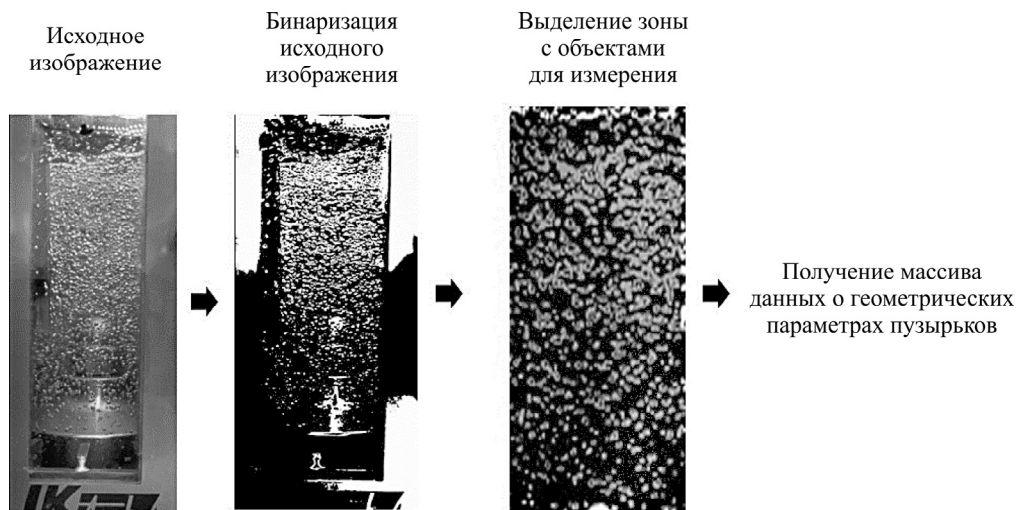


Рис. 4. Алгоритм определения параметров распределения значения геометрических размеров пузырьков

Серия проверочных опытов в трехфазной системе. На основании полученных результатов устанавливалось значение диаметра пузырьков по Соутеру и рассчитывалось наибольшее достигнутое значение удельной интенсивности аэрации. Проводилась серия измерений возникающей разницы электродных потенциалов с добавлением твердой фазы для получения значения расхода воздуха и вспенивателя. В качестве твердой фазы использовалась навеска сульфидной руды массой 200 г и $P_{80} = 90$ мкм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Кривые фиксируемой разности электродных потенциалов ΔE в зависимости от расхода воздуха и вспенивателя представлены на рис. 5.

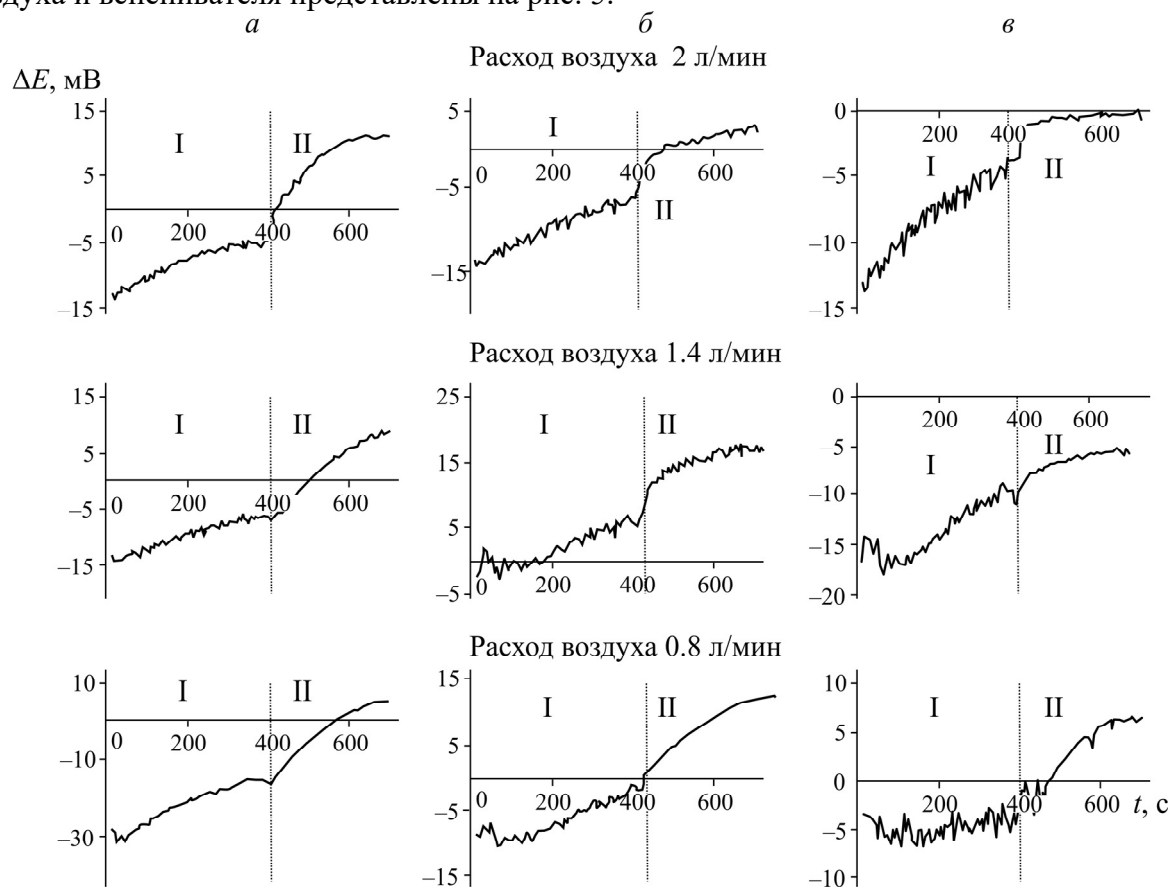


Рис. 5. Полученные кривые разности электродных потенциалов (I — участок стабилизации, II — участок аэрации). Расход вспенивателя: а — 45 г/т; б — 30 г/т; в — 15 г/т

На участке стабилизации значение ΔE составляет от 5 до 15 мВ. Увеличение разности потенциалов, вероятно, обусловлено созданием зон разряжения в массиве жидкости из-за вращения импеллера и изменения концентрации растворенных газов в воде. Возникающие перепады давления влияют на растворимость газов и, как следствие, приводят к изменению их объемного содержания на разной глубине в камере флотомашины. Различия в исходных значениях ΔE может быть вызвано изменениями в концентрациях газов и ионном составе подготовленной воды.

На участке аэрации для всех исследуемых случаев происходит рост значения ΔE . Для большинства случаев на временном интервале 600–700 с такое возрастание ΔE прекращается. Меняющийся характер зависимости ΔE от времени, скорее всего, обусловлен направленным движением пузырьков и массопереносом вспенивателя в фазу пены. Для анализа функциональной зависимости значений ΔE от времени для участка аэрации выполнялись следующие преобразования:

$$\Delta E' = \Delta E + 20; \quad t' = t_{\text{анализа}} - 400.$$

На рис. 6. представлена графическая интерпретация анализа приведенных значений $\Delta E'$.

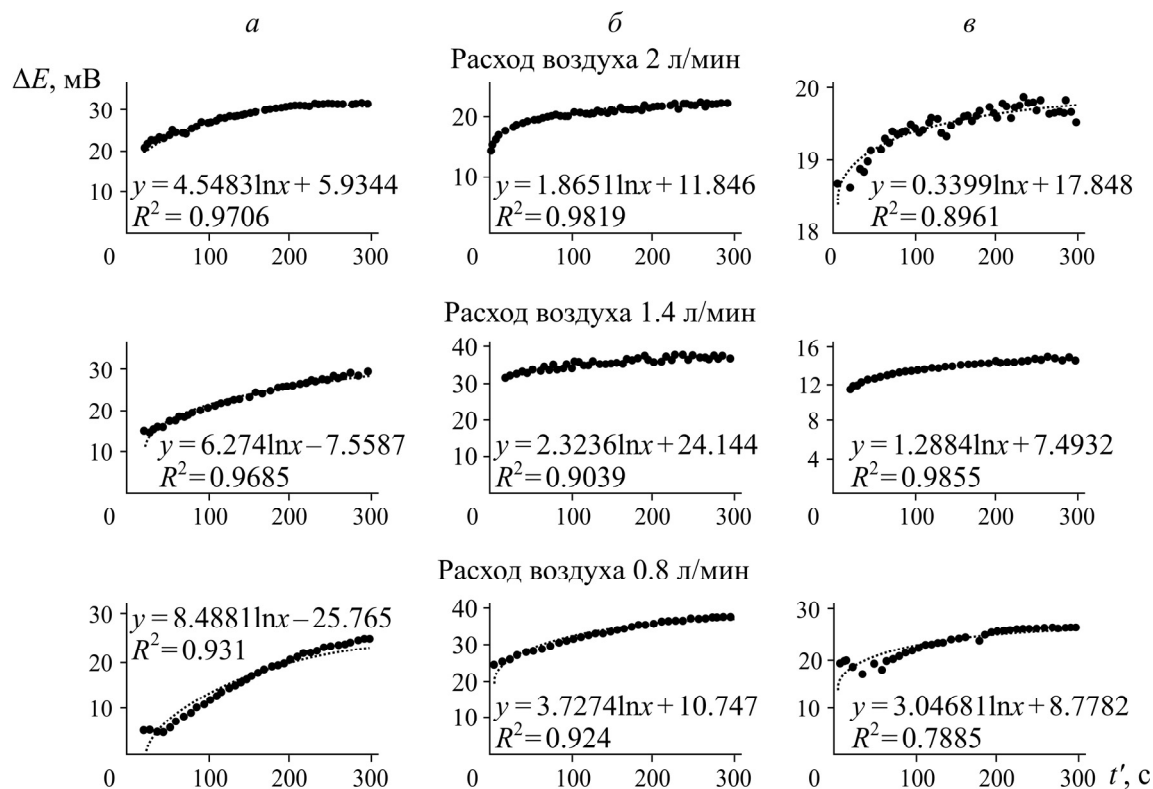


Рис. 6. Кривые приведенных значений разности электродных потенциалов для участка аэрации. Расход вспенивателя: а — 45 г/т; б — 30 г/т; в — 15 г/т

На основании анализа полученных данных установлено, что зависимость разности электродных потенциалов протекания от времени с высокой степенью адекватности описывается выражением вида

$$\Delta E' = E_f \ln t' + C,$$

где E_f — эмпирический коэффициент, характеризующий функцию изменения разности электродных потенциалов протекания на разной глубине во времени; C — поправочный коэффициент.

Эмпирический фактор E_f характеризует скорость возрастания значений разности электродных потенциалов на этапе аэрации. Использование данного фактора для исследования свойств газовой фазы позволяет нивелировать эффект от колебаний исходных значений электродных потенциалов. Наибольшее значение фактора $E_f = 8.49$ установлено при расходе воздуха равном 0.8–45 г/т, наименьшее $E_f = 0.34$ при расходе воздуха 2–15 г/т.

Визуальное определение геометрических размеров пузырьков проводилось по снимкам, сделанным в моменты времени: 450, 480, 510 с. В качестве параметра, характеризующего распределение значений диаметров пузырьков, использовано значение по Соутеру d_{32} :

$$d_{32} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i^3}{\sum_{i=1}^n d_i^2}.$$

Полученные результаты для исследуемых значений расходов воздуха и расходов вспенивателя сведены в таблицу.

Результаты измерений диаметров пузырьков по Соутеру

Расход вспенивателя X_1 , г/т	Расход воздуха X_2 , л/мин	Диаметр пузырьков по Соутеру d_{32} , мм
15	0.8	1.64
15	1.4	1.92
15	2.0	2.05
30	0.8	1.26
30	1.4	1.53
30	2.0	1.74
45	0.8	0.91
45	1.4	1.13
45	2.0	1.35

Набольшее значение диаметра пузырька по Соутеру равное 2.05 мм соответствует расходу вспенивателя 15 г/т и расходу воздуха 2 л/мин. Наименьшее значение диаметра пузырька по Соутеру 0.91 мм отмечается при расходе вспенивателя 45 г/т и расходе воздуха 0.8 л/мин.

Анализ зависимости между диаметром пузырьков по Соутеру и расходом воздуха, а также расходом вспенивателя производился с использованием канонического уравнения плоскости второго порядка. Коэффициенты уравнения плоскости подбирались на основании метода наименьших квадратов. В качестве варьируемых факторов выбраны расход воздуха и расход вспенивателя. Для упрощения расчетов уровни факторов кодировались как значения $-1, 0, +1$. В качестве функции отклика исследовался фактор d_{32} . Получено следующее результирующее уравнение для кодированных значений факторов:

$$d_{32} = 1.53 - 0.37X'_1 + 0.22X'_2 + 0.01X'_1X'_2 - 0.01X'^2_1 - 0.04X'^2_2.$$

Графическая интерпретация результата представлена на рис. 7.

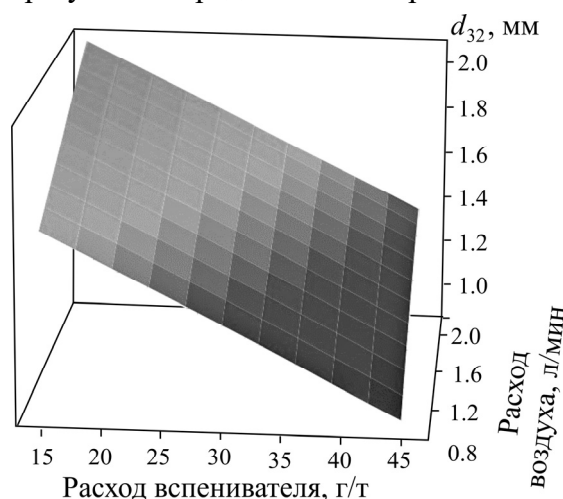


Рис. 7. График зависимости d_{32} от расхода воздуха и расхода вспенивателя

Расхождения между экспериментальными значениями параметра d_{32} и рассчитанными по приведенному уравнению не превышают 5 %. Проверка статистической значимости коэффициентов регрессии показала, что влияние слагаемых X_1^2 , X_2^2 , X_1X_2 незначительно. На исследованном диапазоне варьирования факторов функция отклика может быть задана уравнением ли-

нейной регрессии. Увеличение расхода вспенивателя предотвращает коалесценцию пузырьков и, как следствие, увеличение их геометрических размеров.

Повышение расхода воздуха влечет за собой рост относительной скорости подъема воздушных пузырьков в камере флотомашины. В этих условиях происходит коалесценция мелких пузырьков, что приводит к увеличению значения среднего диаметра пузырьков. На рис. 8. показана зависимость фактора E_f от усредненных значений диаметров пузырьков по Соутеру.

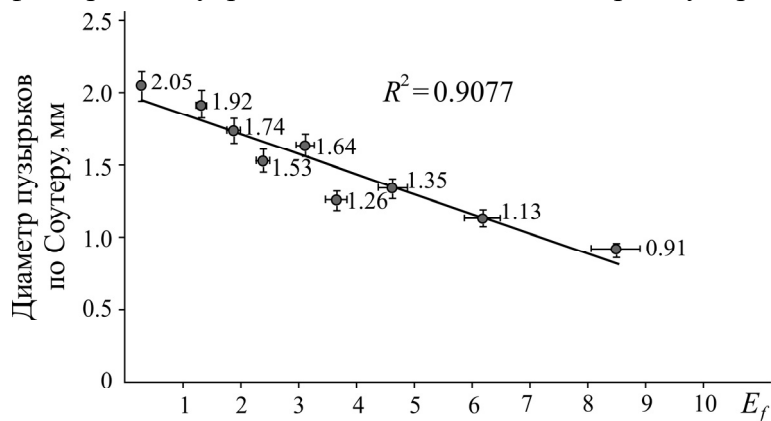


Рис. 8. Зависимость фактора E_f от d_{32}

На основании полученных данных установлено, что зависимость может быть с высокой точностью задана линейным уравнением

$$d_{32} = -0.139E_f + 1.9942.$$

В условиях постоянного перемешивания вклад геометрических характеристик поднимающейся газовой фазы в характер изменения разности электродных потенциалов состоит в скорости изменения значений ΔE . Размер пузырька тем меньше, чем выше значение фактора E_f . Наибольшее значение удельной интенсивности аэрации (1) равное 10.39 с^{-1} соответствует расходу воздуха 2 л/мин и расходу вспенивателя 45 г/т. Для данных условий проведена проверочная серия опытов в трехфазной системе. Графическая интерпретация полученных результатов приведена на рис. 9.

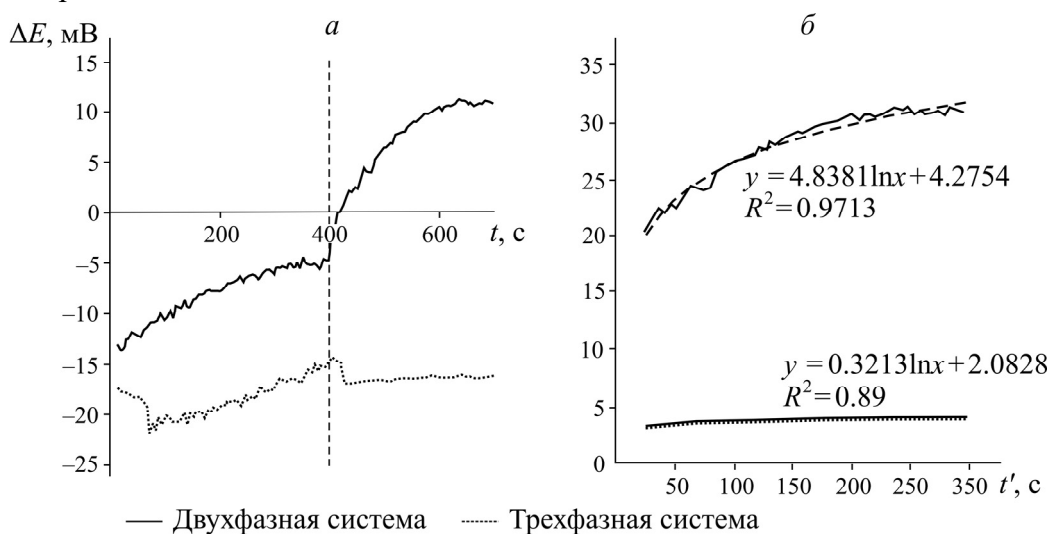


Рис. 9. Корреляция разности электродных потенциалов для двухфазной и трехфазной систем: полученных (а) и приведенных (б)

На участке стабилизации для трехфазной системы происходит резкое падение, затем постепенное возрастание ΔE на 6.91 мВ. Для трехфазной системы на участке аэрации также характерно возрастание разности потенциалов, но с резким падением значения на 2.01 мВ. Установленное значение E_f составляет 0.3213, что на 4.5168 меньше, чем значение для двухфазной системы. Меньшая скорость возрастания разности потенциалов может быть обусловлена электрокинетическими свойствами частиц твердой фазы пульпы, переходящих в пенный продукт за счет явления механического выноса.

ВЫВОДЫ

Установлено, что на этапе аэрации характер изменения значений фиксируемой разности электродных потенциалов зависит от расхода воздуха и расхода вспенивателя. Визуальным методом определены диаметры пузырьков по Соутеру для всех исследованных значений варьируемых факторов. Обосновано наличие линейной корреляции между значением диаметра пузырьков по Соутеру и эмпирическим фактором E_f , характеризующим скорость возрастания разности электродных потенциалов. Проведена серия проверочных измерений возникающей разницы электродных потенциалов в трехфазной системе. Возрастание ΔE на этапе аэрации, как и в случае двухфазной системы, имеет логарифмический характер, но с меньшим значением фактора E_f .

Полученные зависимости могут использоваться при разработке систем автоматизации и контроля подачи воздуха в процессе флотации, а также при тестировании работы аэрационных узлов. Дальнейшее направление исследований состоит в интеграции данного подхода для анализа процесса флотации и характера влияния на значения разности электродного потенциала поведения твердой фазы пульпы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чантурия В. А., Бочаров В. А. Современное состояние и основные направления развития технологии комплексной переработки минерального сырья цветных металлов // Цв. металлы. — 2016. — № 11. — С. 11–18.
2. Чантурия Е. Л. Проблемы комплексной и экологически безопасной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения–2021): Обзор // Устойчивое развитие горных территорий. — 2021. — Т. 13. — № 4. — С. 644–654.
3. Zalesov M. V., Grigoreva V. A., Trubiloval V. S., and Boduen A. Ya. Designing of engineering solutions to enhance efficiency of high-copper gold-bearing ore processing, Gorn. Promyshlennost, 2021, Vol. 2021, No. 5. — P. 51–56.
4. Шабаров А. Н., Николаева Н. В. Комплексное использование отходов переработки теплоэлектростанций // Зап. горн. ин-та. — 2016. — Вып. 220. — С. 607–610.
5. Афанасова А. В., Абурова В. А., Прохорова Е. О., Лушина Е. А. Исследование влияния депрессоров на флотоактивные пороодообразующие минералы при флотации сульфидных золотосодержащих руд // ГИАБ. — 2022. — № 6–2. — С. 161–174.
6. Бричкин В. Н., Куртенков Р. В., Элдиб А. Б., Бормотов И. С. Состояние и пути развития сырьевой базы алюминия небокситовых регионов // Обогащение руд. — 2019. — № 4. — С. 31–37.
7. Бочаров В. А., Игнаткина В. А., Чантурия Е. Л. Основные направления решения проблем комплексной переработки пиритных хвостов флотации медно-цинковых руд // Цв. металлы. — 2011. — № 12. — С. 20–26.

8. **Самыгин, В. Д., Григорьев П. В.** Моделирование влияния гидродинамических факторов на селективность процесса флотации. Ч. 1. Влияние диаметра пузырька и диссипации турбулентной энергии // ФТПРПИ. — 2015. — № 1. — С. 145–152.
9. **Кондратьев С. А.** Обоснование механизма работы физически сорбированного собирателя в элементарном акте флотации // ФТПРПИ. — 2021. — № 1. — 118–136.
10. **Beloglazov I. I., Petrov P. A., and Bazhin V. Y.** The concept of digital twins for tech operator training simulator design for mining and processing industry, *Eurasian Min.*, 2020, Vol. 2020, No. 2. — P. 50–54.
11. **Gharai M. and Venugopal R.** Modeling of flotation process — an overview of different approaches, *Min. Proc. Ex. Met. Rev.*, 2016., Vol. 37. No. 2. — P. 120–133.
12. **Koteleva N., Korolev N., Zhukovskiy Y., and Baranov G.** A soft sensor for measuring the wear of an induction motor bearing by the park's vector components of current and voltage, *Sensors, Multidisciplinary Digital Publ. Inst.*, 2021, Vol. 21. — Article ID 7900.
13. **Александрова Т. Н., О'Коннор С.** Переработка платинометаллических руд в России и Южной Африке: состояние и перспективы // Зап. горн. ин-та. — 2020. — № 4. — 462–473.
14. **Игнаткина В. А.** Селективные реагентные режимы флотации сульфидов цветных и благородных металлов из упорных сульфидных руд // Цв. металлы. — 2016. — № 11. — 27–33.
15. **Лавриненко А. А.** Состояние и тенденции развития флотационных машин для обогащения твердых полезных ископаемых в России // Цв. металлы. — 2016. — № 11. — С. 19–26.
16. **Кондратьев С. А., Лавриненко А. А.** Вопросы конструирования флотационных машин и эффективности их использования // ФТПРПИ. — 2008. — № 3. — С. 76–85.
17. **Finch J. A., Xiao J., Hardie C., and Gomez C.** Gas dispersion properties: bubble surface area flux and gas holdup, *Miner. Eng.*, 2000, Vol. 13, No. 4. — P. 365–372.
18. **Gorain B. K., Franzidis J.-P., and Manlapig E. V.** Studies on impeller type, impeller speed and air flow rate in an industrial scale flotation cell. P. 3: Effect on superficial gas velocity, *Miner. Eng.*, 1996, Vol. 9, No. 6. — P. 639–654.
19. **Azgomi F., Gomez C. O., and Finch J. A.** Characterizing frothers using gas hold-up, *Can. Metall. Q.*, 2007, Vol. 46, No. 3. — P. 237–242.
20. **Leiva J., Vinnett L., Contreras F. A., and Yianatos J.** Estimation of the actual bubble surface area flux in flotation, *Miner. Eng.*, 2010, Vol. 23, No. 11. — С. 888–894.
21. **Александрова Т. Н., Ромашев А. О., Кузнецов В. В.** Развитие методического подхода к определению флотационной способности тонковкрапленных сульфидов // Обогащение руд. — 2020. — № 2. — С. 9–14.
22. **Deglon D. A., Sawyerr F., and O'Connor C. T.** A model to relate the flotation rate constant and the bubble surface area flux in mechanical flotation cells, *Miner. Eng.*, 1999, Vol. 12, No. 6. — P. 599–608.
23. **Tucker J. P., Deglon D., Franzidis J., Harris M. C., and O'connor C.** An evaluation of a direct method of bubble size distribution measurement in a laboratory batch flotation cell, *Miner. Eng.*, 1994, Vol. 7, No. 5–6. — P. 667–680.
24. **Wang L. and Yoon R.-H.** Effects of surface forces and film elasticity on foam stability, *Int. J. Miner. Process.*, 2008, Vol. 85, No. 4. — P. 101–110.
25. **Ксенофонтов Б. С., Антонова Е. С.** Исследование дисперсного состава водовоздушной смеси, генерируемой эжекционной системой аэрации, в процессе флотационной очистки сточной воды // Безопасность в техносфере. — 2016. — Вып. 5. — № 4. — С. 38–44.
26. **Castro S. et al.** Effect of frothers on bubble coalescence and foaming in electrolyte solutions and seawater, *Int. J. Min. Process.*, 2013, Vol. 124. — P. 8–14.
27. **Hernandez-Aguilar J. R., Coleman R. G., Gomez C., and Finch J.** A comparison between capillary and imaging techniques for sizing bubbles in flotation systems, *Miner. Eng.*, 2004, Vol. 17, No. 1. — P. 53–61.

28. **Bradshaw D. J. and Connor C. T.** Measurement of the sub-process of bubble loadin in flotation, *Miner. Eng.*, 1996, Vol. 9, No. 4. — P. 443–448.
29. **Grau R. A. and Heiskanen K.** Bubble size distribution in laboratory scale flotation cells, *Miner. Eng.*, 2005, Vol. 18, No. 12. — P. 1164–1172.
30. **Naik S. and Van Drunick W.** Anglo research (AR) experience with integrated comminution and flotation plant modelling, *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.*, 2007, Vol. 107, No. 10. — P. 641–650.
31. **Mesa D., Quintanilla P., and Reyes F.** Bubble analyser — an open-source software for bubble size measurement using image analysis, *Miner. Eng.*, 2022, Vol. 180. — Article ID 107497.
32. **Elmahdy A. M., Mirnezami M., and Finch J. A.** Zeta potential of air bubbles in presence of frothers, *Int. J. Miner. Process.*, 2008, Vol. 89, No. 1. — P. 40–43.
33. **Jia W., Ren S., and Hu B.** Physics, Chinese Academy of Sciences.
34. **Usui S., Sasaki H., and Matsukawa H.** The dependence of zeta potential on bubble size as determined by the dorn effect, *J. Colloid Interface Sci.*, 1981, Vol. 81, No. 1. — P. 80–84.

Поступила в редакцию 24/VIII 2022

После доработки 29/VIII 2022

Принята к публикации 21/IX 2022