

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КРУПНОСТИ ФЛОТИРУЕМЫХ ЧАСТИЦ ОТ ИХ СВОЙСТВ И ГИДРОДИНАМИКИ ФЛОТАЦИОННОЙ КАМЕРЫ**

*Сергей Александрович Кондратьев*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, зав. лабораторией полезных ископаемых и технологической экологии, тел. (383)205-30-30, доп. 120, e-mail: kondr@misd.ru

*Ксения Андреевна Коваленко*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, ученый секретарь, тел. (383)205-30-30, доп. 200, e-mail: kovalenko\_ka@misd.ru

Отмечено, что наибольшую скорость флотации имеют частицы среднего размера. Зерна граничных классов размерного диапазона обладают пониженной флотиремостью, и на них приходится более 50% всех потерь извлекаемых минералов при флотации. Рассматриваются условия стабильности флотационного агрегата «частица – пузырек» в камере машины пенной флотации. Изучено влияние возмущений поверхности пузырька на крупность флотиремых частицы. Амплитуда начальной деформации поверхности и амплитуда начальной скорости деформации поверхности пузырьков определялись в зависимости от энергии турбулентных пульсаций окружающей жидкости. Установлено, что скорость диссипации энергии в камере флотационной машины оказывает умеренное воздействие на крупность извлекаемых зерен. Изучено влияние поверхностных свойств минеральных частиц и их массы на верхнюю величину размерного диапазона частиц. Показано, что гидрофобность поверхности оказывает значительное влияние на крупность минеральных частиц, сохраняющих контакт с газовой фазой. Основным параметром, характеризующим влияние гидрофобности поверхности флотиремых частиц на значение силы отрыва, может служить величина наступающего контактного угла.

**Ключевые слова:** флотация, флотационный агрегат «частица-пузырек», крупность частиц, гидрофобность, энергия диссипации, турбулентность, наступающий угол контакта

## **DETERMINATION OF THE DEPENDENCE OF THE SIZE OF THE FLOATED PARTICLES ON THEIR PROPERTIES AND THE HYDRODYNAMICS OF THE FLOTATION CHAMBER**

*Sergey A. Kondratyev*

N.A. Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, D. Sc., Head of Complex Mineral Mining and Processing Department, phone: (383)205-30-30, extension 120, e-mail: kondr@misd.ru

*Ksenia A. Kovalenko*

N.A. Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Scientific Secretary, phone: (383)205-30-30, extension 200, e-mail: kovalenko\_ka@misd.ru

It is noted that medium-sized particles have the highest flotation rate. Grains of the boundary classes of the size range have a reduced floatability, and they account for more than 50% of all losses of extracted minerals during flotation. The stability conditions of the particle – bubble flotation unit in the chamber of the foam flotation machine are considered. The effect of perturbations of the bubble surface on the size of the floated particles is studied. The amplitude of the initial deformation of the surface and the amplitude of the initial deformation rate of the bubble surface were determined depending on the energy of the turbulent pulsations of the environmental liquid. It is established that the rate of energy dissipation in the chamber of the flotation machine has a moderate effect on the size of the extracted grains. The influence of the surface properties of mineral particles and their mass on the upper value of the particle size range is studied. It is shown that the hydrophobicity of the surface has a significant effect on the size of the mineral particles that remain in contact with the gas phase. The main parameter that characterizes the effect of the hydrophobicity of the surface of the floated particles on the value of the separation force can be the value of the advancing contact angle.

**Keywords:** flotation, flotation unit «particle-bubble», particle size, hydrophobicity, dissipation energy, turbulence, incoming contact angle

### *Введение*

Во флотационной пульпе находятся частицы самых разных размеров. Практика флотации свидетельствуют о том, что флотируемость минералов сильно зависит от размера частиц [1, 2].

Наибольшую скорость флотации имеют частицы среднего размера. Зерна граничной или предельной крупности обладают пониженной флотируемостью и на них приходится более 50% всех потерь извлекаемых минералов. Верхний предел крупности для сульфидных минералов в стандартных условиях пенной флотации составляет ~150 мкм, для не сульфидных – от 200 до 500 мкм (в зависимости от их плотности), нижний предел – 10 мкм [3]. Уже с первых дней промышленного применения флотации внимание исследователей сосредоточено на установлении зависимости флотируемости минеральных частиц от их размеров. Этот вопрос представляет большой теоретический интерес. Его решение поможет расширить диапазон крупности извлекаемых зерен и улучшить ряд смежных обогатительных процессов [4].

Осуществление флотации более крупных частиц с достаточной полнотой перевода их в пену, позволит значительно интенсифицировать процессы измельчения, фильтрации, сушки, сгущения и другие стадии обогащения руды, снизив тем самым стоимость обогащения. Повышение крупности в основной флотации в 3-4 раза приведет к сокращению потерь ценных минералов в виде переизмельченных зерен и снижению энергетических затрат на рудоподготовку примерно в 2 раза [2]. В ряде случаев флотация более крупных частиц минерала повышает селективность процесса и значительно улучшает процессы дальнейшего технологического передела концентратов. Так увеличение крупности флотируемых зерен углей повышает значение этого метода обогащения при переработке углей. Автоклавная плавка концентратов руд самородной серы протекает более эффективно на крупных продуктах. Крупные зерна графита в ряде случаев имеют большую ценность, чем мелкие.

Увеличение селективности флотации тонких минеральных фракций, устранение их отрицательного влияния на флотацию является одной из важнейших проблем современной теории и практики флотации [5-9]. До сих пор не освоено флотационное обогащение охристых, легко шламующихся окисленных минералов, содержащих железо, молибден, свинец, вольфрам и т.п. Необходимость тщательного обесшламливания делает нерентабельным обогащение ряда руд с большим содержанием глин и первичных шламов. Показатели обогащения многих руд сравнительно низкие вследствие слишком больших потерь полезных минералов в тонких шламовых фракциях [1, 2].

Предметом работы многих исследователей является изучение влияния гидрофобности на крупность извлекаемых частиц [1, 2, 10-18]. В [10] для оценки связи максимального размера  $d_{max}$  флотируемых частиц и наступающего контактного угла, были использованы две флотационные модели – частица на границе раздела «жидкость–газ» и агрегат «частица-пузырек», основанные на балансе сил. Установлено, что  $d_{max}$  извлекаемых частиц зависит от их размера, плотности, гидрофобности, динамики процесса и других параметров.

Для изучения влияния свойств частиц на кинетику смачиваемости методом капиллярного подъема было исследовано большое количество частиц разных типов и размеров (60-520 мкм) [11]. Путем измерения скорости проникновения различных жидкостей в упакованные слои стеклянных шариков было установлено, что ни размер частиц, ни распределение пор по размерам не влияют на значения контактных углов, но обнаружено влияние последних на скорость проникновения.

Флотационное поведение кварцевых частиц, поверхность которых в различной степени гидрофобизирована органосилановым соединением, изучено в диапазоне размеров частиц от 15 до 125 мкм [12]. Сообщается, что для каждого размера частиц существует определенное значение контактного угла, меньше которого частица не будет флотироваться. Это приводит к понятию флотационной области, которая определяется размером частиц и углом контакта, в пределах которой возможна флотация. Установлено, что зависимость константы скорости флотации от размера частиц существенно линейна, что противоречит данным в [11]. Сообщается, что значения угла контакта необработанных частиц галенита зависят от способа подготовки, а не от размера частиц [13].

Другие экспериментальные работы, опубликованные на сегодняшний день, также подтверждают существование критического угла контакта, ниже которого флотация не происходит [14 - 17]. Установлено, что флотация мелкодисперсных метилированных кварцевых частиц размером 3 мкм в камере с механическим перемешиванием мешалкой Раштон и в трубке Халлимонда происходит только при достижении контактного угла  $60^\circ$  [15]. Работы [16, 17] посвящены изучению флотации тонких частиц. В механической флотационной камере исследовано флотационное поведение метилированных кварцевых частиц в диапазоне размеров от 0,2 до 50 мкм в зависимости от меняющегося угла контакта. Экспериментальные результаты показывают, что флотационное извлечение мелких частиц является функцией как угла контакта частиц (гидрофобности), так и размера.

Точнее, извлечение увеличивается с увеличением угла контакта и уменьшается с уменьшением размера частиц, что согласуется с предыдущими исследованиями [12]. Увеличение поверхностной гидрофобности приводит к более быстрому разрыву прослойки между пузырьком и частицей [18], то есть к сокращению времени индукции. С термодинамической точки зрения, по мере увеличения гидрофобности частиц потенциальная энергия взаимодействия между частицей и пузырьком возрастает. Результаты флотации, полученные в этой работе, свидетельствуют о том, что если мелкие частицы обладают достаточной гидрофобностью, они могут прикрепляться к пузырькам. Другими словами, флотация мелких частиц возможна при достижении критического значения угла контакта. Теоретические расчеты пределов флотации для тонкодисперсных частиц, выполненные Scheludko A. и др., не дают хорошего согласования с экспериментальными данными [19]. Напротив, существует очень хорошее согласие между экспериментальными данными и моделью, которая была разработана Drelich J. и Miller J.D. [20]. В этой модели учитывается корреляция между гидрофобностью поверхности (углом контакта) и шероховатостью поверхности частиц с помощью псевдолинейного натяжения, которое лучше отражает условия флотации частиц, используемых в их исследовании.

Авторы обзора [21] пришли к выводу, что угол контакта и смачивание твердых частиц зависят от многих физических и химических факторов, таких как шероховатость поверхности, ее неоднородность, а также форма и размер частиц. Отмечено, что степень смачивания поверхности зависит также и от гидродинамических условий. Неспособность различить эффекты каждого фактора может быть вызвана взаимодействием и/или перекрытием двух или более факторов в каждой системе. Отсутствует жесткая количественная корреляция между факторами, влияющими на смачивание, поведение смачивания и угол контакта минералов, следовательно, и их влияние на процесс флотации.

Анализ результатов приведенных работ показывает их противоречивость. Целью данной работы является определение условия стабильности флотационного агрегата «частица – пузырек» в камере машины пенной флотации.

### ***Методы и материалы***

Пенная флотация осуществляется в условиях турбулентного (вихревого) движения пульпы необходимого для ее суспендирования. Вероятность флотации полезного минерала зависит от вероятности выполнения отдельных этапов этого процесса. К ним относятся: взаимодействие частиц с реагентами, столкновение их с пузырьками, закрепление на пузырьках, деминерализация газовой фазы, образование и разрушение сложных аэрофлокул, процессы, происходящие в пенном слое и т.д. [2]. Турбулентность, характеризуется диссипацией энергии внутри флотационного объема и присуща всем конструкциям камер флотационных машин. Она определяется величиной подводимой импеллером энергии, геометрией конструктивных элементов, ограничивающих внутренний объем камеры, и свойствами среды. Турбулентность и порождаемая ею сила инерции

массы частицы оказывают определяющее влияние на один из важнейших показателей процесса флотации, крупность извлекаемых флотацией частиц.

В работе [22] представлен расчет колебаний минеральной частицы на поверхности пузырька. Динамические уравнения, описывающие движение механической системы «частица – пузырек» и движение возникающие в невязкой несжимаемой жидкости, получены с помощью лагранжевой механики. Определены потенциальная и кинетическая энергия системы. Найден лагранжиан агрегата «частица – пузырек» в терминах кинетической и потенциальной энергий  $L = L_f + L_p = (T - U)_f + (T - U)_p$ , который был использован для записи уравнений Эйлера – Лагранжа:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{b}_j} - \frac{\partial L}{\partial b_j} = \lambda \frac{\partial g}{\partial b_j}, \quad j = 1, \dots, N + 1; \quad g(b_1, \dots, b_N, b_{N+1}, t) = 0 \quad (1)$$

Решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений (1) требует задания начальных данных для функций и их первых производных. В начальный момент можно задать возмущения поверхности пузырька – обобщенные координаты  $b_j$  и их производные по времени  $\dot{b}_j$  – скорость перемещения стенок пузырька. Для задания начальной скорости производных по времени обобщенных координат рассмотрен турбулентный поток, в котором находится флотационный агрегат. Средняя скорость турбулентных пульсаций в инерционном интервале спектра турбулентности дается выражением:

$$\bar{u}' = C(\varepsilon l)^{\frac{1}{3}}, \quad (2)$$

где  $C$  – постоянная, равная 1,37;  $\varepsilon$  – скорость диссипации энергии,  $\text{м}^2/\text{с}^3$ ;  $l$  – масштаб турбулентных образований, м.

Таким образом, зная  $\varepsilon$  можно дать оценку начальной скорости возмущений поверхности пузырька, то есть производные по времени обобщенных координат  $\dot{b}_j$ . Распределение скорости диссипации энергии по камере флотомшины определено методами вычислительной гидродинамики в программной среде ANSYS Fluent. Расчетная геометрическая модель лабораторной флотационной машины создана в геометрическом препроцессоре Design Modeler. Геометрия модели представлена прямоугольной камерой, статором и импеллером. Пространственная дискретизация расчетной области проведена с помощью модуля Meshing. Для моделирования турбулентного потока применена модификация  $k$ - $\varepsilon$ -модели турбулентности – Realizable и неравновесная пристеночная функция: Enhanced Wall Function [23]. Численный эксперимент проводили при следующих условиях: скорость вращения импеллера 2200 об/мин; рабочая жидкость вода, имеющая вязкость 0,001 кг/(м·с) и плотность 998,2 кг/м<sup>3</sup>, при температуре 20°C. Вращение импеллера моделировали в стационарной постановке, используя Multiple Reference Frame.

## Результаты

Принято, что в камере флотационной машины концентрации частиц и пузырьков крайне малы. Распределение скоростей диссипации энергии турбулентного движения по камере флотационной машины практически не зависит от содержания пузырьков и минеральных частиц и может быть определено в рамках однофазной среды. В результате вычислительного эксперимента получено поле скорости диссипации энергии в горизонтальной плоскости на уровне середины лопаток импеллера (рис. 1).

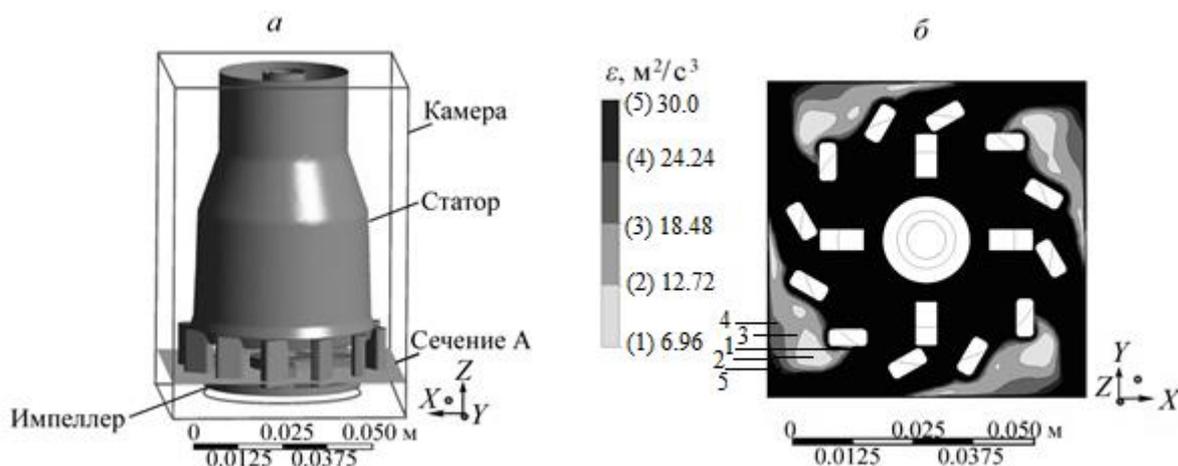


Рис. 1. Трехмерная геометрическая модель конструкции камеры лабораторной флотационной машины и сечение  $A$ , вдоль которого получено распределение энергии ( $a$ ); поле скорости диссипации энергии в камере лабораторной флотационной машины в плане на уровне середины лопаток импеллера ( $b$ )

Для решения системы уравнений (1) находились начальные условия в предположении, что образование и разрушение агрегатов «частица – пузырек» происходило на выходе из области статора в приимпеллерной зоне. В наших расчетах значение  $\varepsilon$  выбрано 15 и 30  $\text{м}^2/\text{с}^3$ . При заданных значениях  $\varepsilon$  и размере турбулентного образования 0,002 м средняя пульсационная скорость пространственно-изотропных пульсаций согласно зависимости (2) составит 0,43 и 0,54 м/с, соответственно. На агрегат «частица – пузырек» могут оказать влияние пульсации большего масштаба. Следует учитывать, что функция плотности распределения скоростей пульсаций жидкости, подчиняется закону нормального распределения вероятностей. Стандартное отклонение от среднего значительно и поэтому скорость пульсаций может превышать среднее значение, вычисленное по уравнению (2). Будем считать, что начальная скорость стенки пузырька равна скорости турбулентного образования, действующего на эту стенку.

Результаты расчетов, представленные на рис. 2, 3. подтверждают ранее установленную зависимость крупности флотируемых частиц от наступающего контактного угла [14-17]. Установлено, что если гидрофобность минеральной

частицы можно охарактеризовать максимальным наступающим статическим углом  $\theta_{max}=25^\circ$ , то при  $\varepsilon=15 \text{ м}^2/\text{с}^3$ , она сохранит контакт с пульсирующим пузырьком (рис. 2а). Увеличение скорости диссипации энергии в камере машины до  $30 \text{ м}^2/\text{с}^3$  потребует увеличение наступающего контактного угла до  $40^\circ$  для сохранения флотационного контакта (рис.2б). Все частицы с гидрофобностью меньше  $40^\circ$  будут сброшены с поверхности пузырька. Отрыв минеральной частицы от пузырька происходит в результате смыкания периметра контакта трех агрегатных состояний при достижении значений  $\theta_{max}$ . Данные рис. 2. позволяют сделать вывод, что увеличение энергии диссипации оказывает незначительное увеличение на амплитуду колебаний частицы. Плотность частицы оказывает большее влияние на амплитуду ее колебаний (рис. 2а, в).

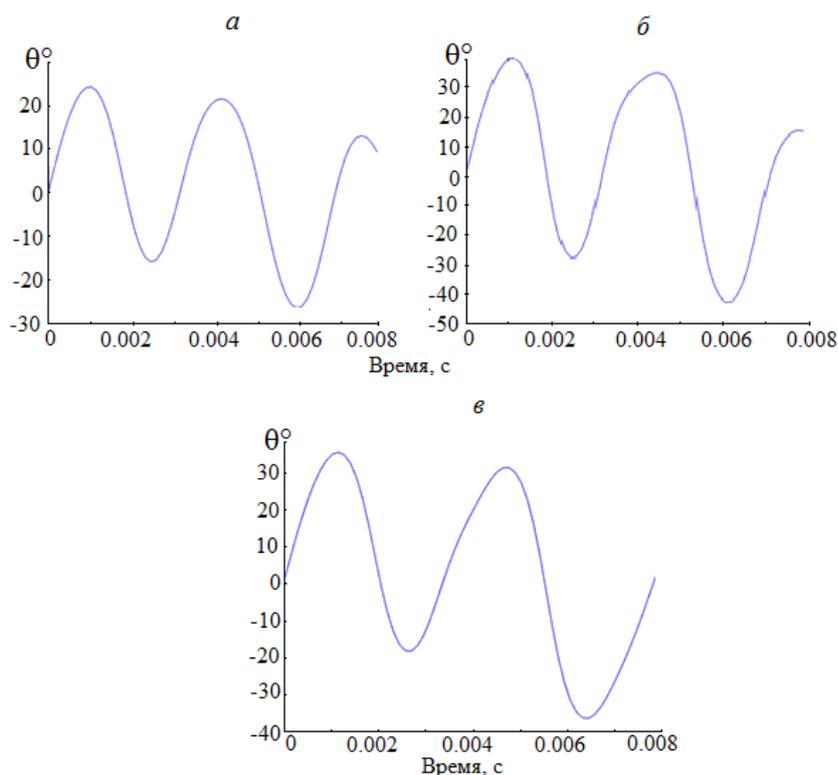


Рис. 2. Отклонение контактного угла  $\theta$  от горизонтали в зависимости от времени в камере флотационной машины для минеральной частицы цилиндрической формы высотой 250 и диаметром 125 мкм: а –  $\varepsilon = 15 \text{ м}^2/\text{с}^3$ , плотность частицы  $6000 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; б –  $\varepsilon = 30 \text{ м}^2/\text{с}^3$ , плотность частицы  $6000 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; в –  $\varepsilon = 15 \text{ м}^2/\text{с}^3$ , плотность частицы  $7500 \text{ кг}/\text{м}^3$

На рис. 3 показан контактный угол на поверхности основания цилиндрической частицы в зависимости от размеров частицы. Расчеты проведены для пузырька радиусом 800 мкм; минеральной частицы цилиндрической формы радиусом  $r_0=100-300$  мкм и высотой  $h=2r_0$ . Плотности частицы и жидкости составляли 4500 и  $1000 \text{ кг}/\text{м}^3$ , соответственно; коэффициент поверхностного натяжения жидкости –  $0.072 \text{ Н}/\text{м}$ ; начальная скорость частицы  $0.5 \text{ м}/\text{с}$ .

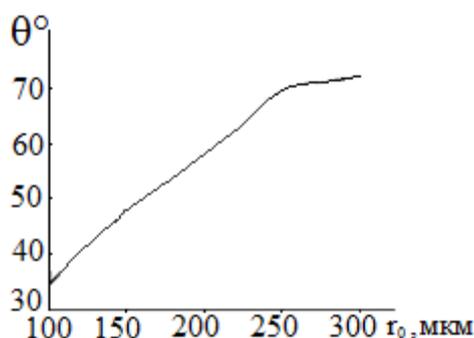


Рис. 3. Максимум контактного угла  $\theta$  в зависимости от размеров минеральной частицы

Видно, что для частиц размерами ~150, 200, 250 и 300 мкм при достижении наступающего контактного угла в значениях ~48, 55, 68 и 72°, соответственно, произойдет разрушение агрегата «частица-пузырек».

### **Выводы**

Показано, что основная сила отрыва частиц — инерционная, обусловлена поверхностными колебаниями пузырьков. Амплитуда поверхностных колебаний пузырька является функцией скорости диссипации энергии в камере флотационной машины, частота определяется собственной частотой поверхностных колебаний. Инерционная сила отрыва частиц — функция их вынужденных колебаний. Установлено, что во время колебаний частицы на поверхности пузырька, совершающего поверхностные колебания, контактный угол изменяется в широких пределах, что предполагает устойчивое закрепление периметра трехфазного контакта на ребрах частицы. При достижении контактным углом величины динамического наступающего контактного угла возможно смыкание линии смачивания на минеральной поверхности и отрыв частицы от пузырька. Подтверждена ранее установленная зависимость крупности флотируемых частиц от наступающего контактного угла. Выявлено, что турбулентность в камере флотационной флотомашины оказывает умеренное воздействие на крупность извлечения минеральных частиц, а плотность частицы значительно влияет на амплитуду ее колебаний.

*Работа выполнена в рамках проекта НИР (Код научной темы FWNZ -2021-0002)*

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Глембоцкий В. А., Классен В. И. Флотационные методы обогащения. Учебник для вузов. – М.: Недра. – 1981. – 304 с.
2. Абрамов А.А. Флотационные методы обогащения: Учебник для вузов. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, издательство «Горная книга», «Мир горной книги». – 2008. – 710 с.

3. Богданов О.С., Максимов И.С., Поднек А.К. и др. Теория и технология флотации руд. – М.: Недра. – 1990. – 363 с.
4. Классен В.И., Мокроусов В.А. Введение в теорию флотацию. – М.: Госгортехиздат. – 1959. – 636 с.
5. Deriagin B.V., Dukhin S.S. Theory of flotation of small and medium size particles // Trans. Inst. Min. Metall. – 1961. – V. 70. – P. 221 – 246.
6. Deriagin B.V., Dukhin S.S. Kinetic theory of the flotation of fine particles // Proceedings 13<sup>th</sup> Int. Miner. Process. Congr., Warszawa. – 1979. – 2. – P. 21 – 62.
7. Subrahmanyam T.V., Fossberg E.F.S. Fine particle processing: Shear flocculation and carrier flotation – A review // International Journal of mineral processing. – 1990. – Vol. 30. – P. 265 – 286.
8. Sivamohan R. The problem of recovering very fine particles in mineral processing – A Review // International journal of mineral processing. – 1990. – Vol. 28. – P. 247 – 288.
9. Rubio J., Souza M.L., Smith R.W. Overview of flotation as a wastewater treatment technique // Minerals Engineering. – 2002. – № 15. – P. 139. – 155.
10. Kowalczyk P.B., Sahbaz O., Drzymala J. Maximum size of floating particles in different flotation cells // Minerals Engineering. – 2011. – V. 24. – P. 766 – 771.
11. Dang-Vu T., Hupka J. Characterization of porous materials by capillary rise method // *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. – 2005. – P. 47 – 65.
12. Crawford R., Ralston J. The influence of particle size and contact angle in mineral flotation // International Journal of Mineral Processing. – 1988. – V. 23. – P. 1 – 24.
13. Prestidge C.A., Ralston J. Contact angle studies of particulate sulfide minerals // Minerals Engineering. – 1996. – V. 9. – P. 85 – 102.
14. Gontijo Cd. F., Fornasiero D., Ralston J. The limits of fine and coarse particle flotation // Can. J. Chem. Eng. – 2007. – V. 85. – P. 739 – 747.
15. Miettinen T. Fine Particles Flotation // PhD Thesis. University of South Australia, Mawson Lakes, 2007.
16. Chipfunhu D., Zanin M., Grano S. The dependency of the critical contact angle for flotation on particle size – Modelling the limits of fine particle flotation // Minerals Engineering. – 2011. – V. 24. – P. 50 – 57.
17. Chipfunhu D., Zanin M., Grano S. Flotation behaviour of fine particles with respect to contact angle // Chemical engineering research and design. – 2012. – V. 90. – P. 26 – 32.
18. Hewitt D., Fornasiero D., Ralston J. Aqueous film drainage at quartz/water/air interface // J. Chem. Soc. Faraday Trans. – 1993. – V. 89. – P. 817 – 822.
19. Scheludko A., Toshev B.V., Bojadjiev D.T. Attachment of particles to a liquid surface (capillary theory of flotation) // Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases. – 1976. – V. 72. – P. 2815 – 2828.
20. Drelich J., Miller J.D. The effect of surface heterogeneity on pseudo-line tension and the flotation limit of fine particles // Colloids Surf. – 1992. – V. 69. – P. 35 – 43.
21. Chau T.T., Bruckard W.J., Koh P.T.L., Nguyen A.V. A review of factors that affect contact angle and implications for flotation practice // Advances in colloid and interface science. – V. 150. – 2009. – P. 106 – 115.
22. Кондратьев С.А., Мошкин Н.П. Взаимодействие минеральной частицы со свободным пузырьком воздуха в жидкости // ФТПРПИ. – 2020. – №6. – С. 125 – 135.
23. Миньков Л.Л., Моисеева К.М. Численное решение задач гидродинамики с помощью вычислительного пакета Ansys Fluent: учеб. пособие. – Томск: STT, 2017. – С. 122.

© С. А. Кондратьев, К. А. Коваленко, 2021