

Е. И. Назимко, докт. техн. наук,
И.Н. Друц

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЛКИХ ЧАСТИЦ С ПУЗЫРЬКАМИ ВОЗДУХА В ПРОЦЕССЕ ФЛОТАЦИИ

Виконане комп'ютерне моделювання взаємодії дрібних частинок з повітряними бульбашками при утворенні флотаційного комплексу. Встановлено, що ексцентриситет зіткнення частинки та бульбашки є провідним чинником, що впливає на вірогідність закріплення частинки та існування флотокомплексу.

Ключові слова: флотація, частинки, повітряні бульбашки, взаємодія, комп'ютерне моделювання.

Выполнено компьютерное моделирование взаимодействия мелких частиц с воздушными пузырьками при образовании флотационного комплекса. Установлено, что эксцентриситет столкновения частицы с пузырьком является определяющим фактором, который влияет на вероятность закрепления частицы и существования флотокомплекса.

Ключевые слова: флотация, частицы, воздушные пузырьки, взаимодействие, компьютерное моделирование.

Современные отечественные и зарубежные исследования направлены на поиск и разработку новых способов обогащения тонких классов углей и шламов, включая нетрадиционные способы применительно к угольному сырью. Это связано с тем, что проблема обработки шламов остается открытой, особенно в настоящее время, когда многие предприятия стремятся уйти от использования флотации и ограничить или вообще исключить применение дорогостоящей термической сушки. Однако, наиболее производительным процессом для обогащения угольной мелочи все-таки остается именно флотационный метод, особенно в случае глубокого обогащения углей - до 0 мм, и для углей коксующихся марок. Кроме того, флотация имеет широкое использование при обогащении многих руд.

В течение многих лет отечественные и зарубежные ученые вносили вклад в исследование флотации применительно к углям и другим полезным ископаемым. Практика использования процесса в промышленности имеет значительные наработки. Большую роль в развитии теории флотационного обогащения имеют работы таких известных ученых как О. С. Богданов, М. Г. Ельяшевич, Б. В. Кизевальтер, В. И. Классен, В. А. Мокроусов, М. А. Эйгелес и других. При этом авторы использовали различные подходы к исследованию важного этапа процесса – образованию флотационного комплекса «минерал – воздушный пузырек». Как отмечается в работе [1], термодинамический анализ процессов, происходящих при флотации на

микроуровне, неизбежно связан с принятием целого ряда малообоснованных допущений и условностей. Одним из перспективных направлений развития современной теории флотации является кинетическое рассмотрение флотационных явлений. При этом под кинетикой процесса понимается рассмотрение во времени всех элементарных его стадий. Наиболее важным этапом флотационного акта является момент встречи частицы и воздушного пузырька и закрепление или не закрепление частицы на нем.

Целью данной работы является исследование процессов, происходящих в момент встречи минеральной частицы и воздушного пузырька с помощью компьютерного моделирования.

Модель базируется на дискретных элементах и принимает к рассмотрению эффект упругости твердого, воды и воздушной фазы, прочность связей между ними, динамическое сопротивление или демпфирование фаз, рассеивание кинетической энергии при столкновениях, силу тяжести, центробежные силы, перемещения, граничные и начальные условия. Настройка модели была выполнена для времени прикрепления при взаимодействии частиц и воздушных пузырьков, их деформаций, траекторий, скоростей и ускорений.

Метод дискретных элементов был первоначально развит в геомеханике для моделирования поведения пород под действием горного давления [2, 3]. Этот метод был позже успешно применен для описания взаимодействия частиц породы и течения потоков [4, 5, 6]. Данная модель базируется на том же приближении, что и модели, представленные в работах [3, 4, 5]. Кроме того, были учтены существенные особенности процесса флотации. Разделяемые частицы имеют действительно комплексное поведение при флотации по сравнению с поведением массива горных пород. Они двигаются и подвергаются множественным актам образования и разрушения флотационных комплексов. Эти процессы управляются физическими и химическими свойствами поверхности минералов, воздушных пузырьков и реагентов. Более подробно применяемая модель описана в работе [7].

Метод моделирования кинетики взаимодействия фаз в процессе флотации основан на моделировании динамики движения частиц и воздушных пузырьков в жидкой среде. Алгоритм расчета предполагает замену реальных твердых зерен и воздушных пузырьков частицами сферической формы, которые перемещаются независимо друг от друга и взаимодействуют посредством прямых соприкосновений. В процессе расчета циклически осуществляется последовательный перебор всех элементов в порядке возрастания их порядкового номера, при этом пересчитываются координаты центров тяжести, скорости всех элементов и действующие силы.

Для первоначальной настройки модели выполнено моделирование процесса отрыва воздушного пузырька от минеральной пластинки. Этот эксперимент компьютерного моделирования был проведен в условиях, воспроизводящих физический эксперимент, подробно описанный в работе [8]. На поверхность стеклянной пластинки наклеивался тонкий слой угольного порошка, затем воздушный пузырек контактировал с этой пластинкой, погруженной в воду, и прикреплялся к ее обратной стороне. После чего пластинка постепенно наклонялась до тех пор, пока пузырек воздуха не отрывался от пластинки и не всплывал. Угол наклона пластинки, при котором происходит отрыв пузырька, считается критическим.

В компьютерной модели поверхность пластинки с наклеенным на нее угольным порошком моделировалась набором мелких угольных частиц, которые были прочно прикреплены одна к другой с помощью подбора коэффициентов нормальной деформации. Экспериментальные данные, полученные для пластинки из органического стекла, имеют значения одного порядка с результатами компьютерного моделирования [7]. Проведенное исследование продемонстрировало приемлемое поведение компьютерной модели при моделировании отдельных стадий процесса взаимодействия фаз при флотационном обогащении и доказало ее эффективность.

В ходе моделирования исследовалось поведение при столкновении падающей вертикально угольной частицы диаметром 0.29 мм и плотностью 1500 кг/м^3 и всплывающего воздушного пузырька диаметром 2 мм с плотностью 1.5 кг/м^3 . Угольная частица сталкивалась с воздушным пузырьком с различным эксцентриситетом (рис. 1).

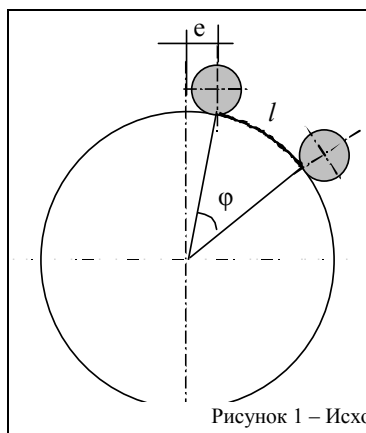


Рисунок 1 – Исходная схема для моделирования

e – эксцентриситет; φ – угол смещения частицы; l – путь скольжения частицы по поверхности пузырька

Скорость угольной частицы задана равной 0.3 мм/с, скорость всплывания воздушного пузырька – 12 мм/с. Модель позволяет проследить практически на каждом цикле счета изменение положения координат центра тяжести всех взаимодействующих элементов, радиуса пузырька, его скорость. Были подобраны соответствующие коэффициенты для входящих в модель параметров (около 30) и граничных условий. Суммарно процесс взаимодействия был моделирован в течение 400 000 циклов. Один цикл счета соответствовал при моделировании 10^{-5} сек. Координаты центров тяжести взаимодействующих тел и состояние флотокомплекса накапливалось в выходном файле каждые 200 циклов.

При моделировании значения эксцентриситета изменялись от 100 до 1000 микрон. Результаты моделирования представлены на рис. 2.

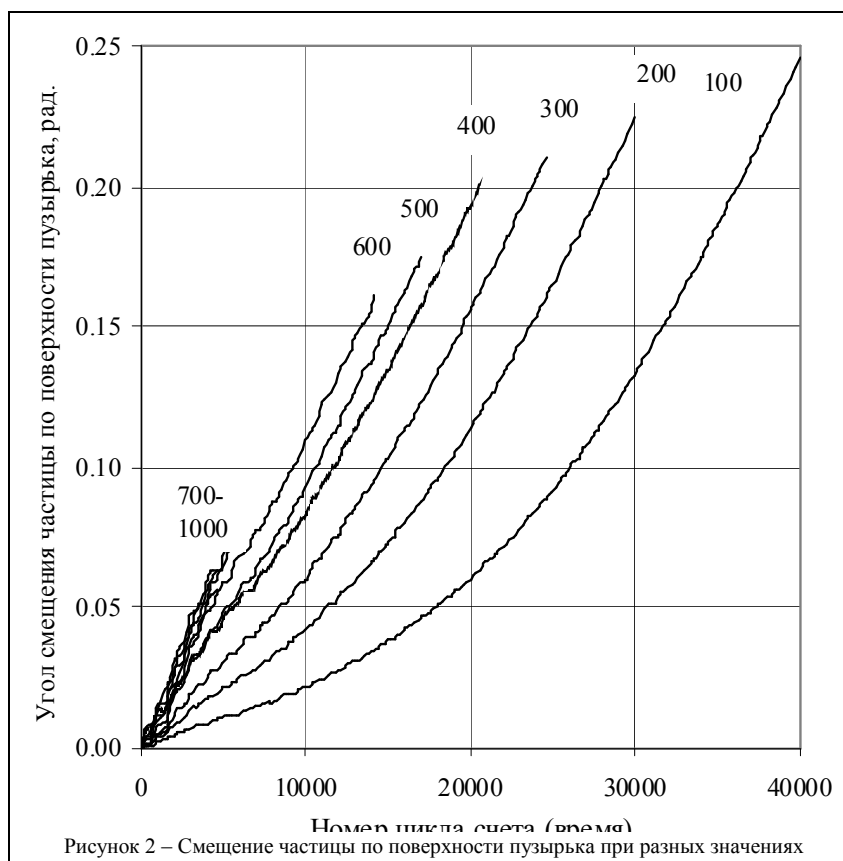


Рисунок 2 – Смещение частицы по поверхности пузырька при разных значениях эксцентриситета столкновения

Анализ данных свидетельствует о том, что с увеличением эксцентриситета столкновения возрастает тангенциальная составляющая скорости частицы и значительно снижается нормальная составляющая скорости, а также вероятность образования флотационного комплекса. К аналогичным выводам пришли и авторы работ [6, 9]. Исследование компьютерного микрофильма подтверждает факт снижения нормальной скорости частицы после столкновения. Кроме того, на рис. 2 можно отметить существование двух семейств кривых. К первому семейству относятся кривые с эксцентриситетом от 100 до 600 мкм. Другую группу формируют остальные кривые.

Кривые на рис. 2 резко обрываются при значении смещения 700-1000 мкм. Это значение смещения соответствует углу встречи около 0.87 рад или примерно 50° (см. рис. 1). Данное явление может быть объяснено различием в природе взаимодействующих сил. С точки зрения механического взаимодействия частицы и пузырька основную роль играют нормальные и тангенциальные силы, если угол встречи менее 50° . При значении угла встречи между 50° и 90° , определяющей является тангенциальная сила. Следовательно, встреча частицы с пузырьком при угле менее критического (50° в данном случае) существенно увеличивает время существования и стабильности флотационного агрегата.

При эксцентриситете равном 100 мкм время существования частицы на пузырьке составляет 398.72 миллисекунды, а для первоначального смещения относительно центра пузырька практически равного его радиусу (1000 мкм) время снижается до 45.19 миллисекунды, т.е. частица «чиркает» по пузырьку и отскакивает от него.

Такое исследование кинетики взаимодействия частиц и воздушных пузырьков позволяет изучать на микроуровне сложные процессы, происходящие при флотации, которые довольно трудно воспроизвести в лабораторных условиях.

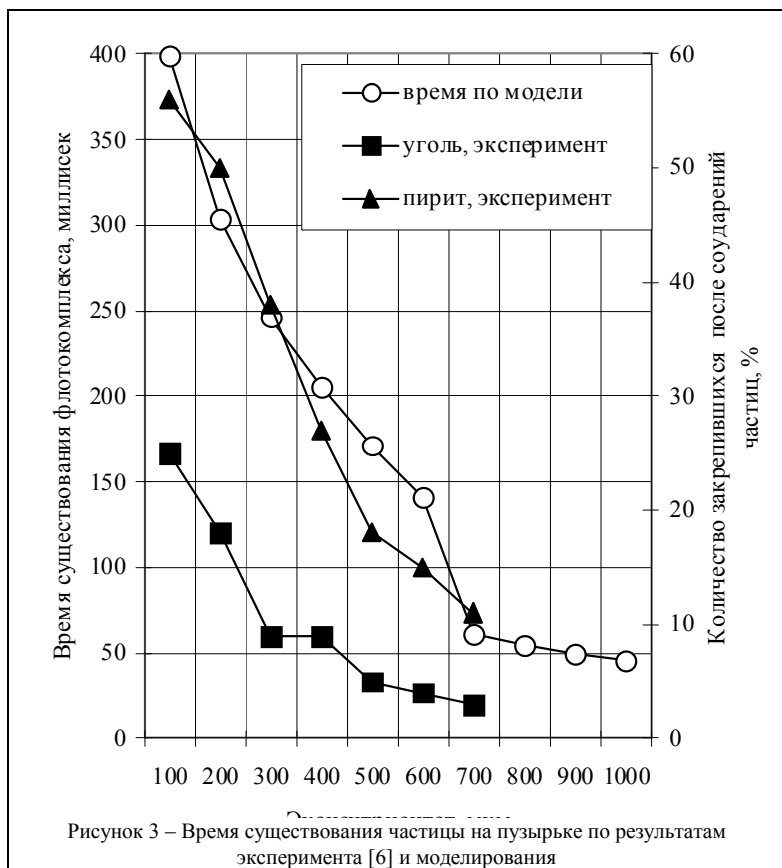
Анализ данных компьютерного моделирования позволяет определить номер цикла счета, на котором происходит разрушение флотационного комплекса, и затем найти абсолютное время его существования. Кроме того, можно определить причины его разрушения.

Различие между двумя группами кривых, представленных на рис.2, четко видно при исследовании времени существования частицы на пузырьке в зависимости от эксцентриситета столкновения. Эта зависимость показана на рис. 3.

При достижении «критического» значения эксцентриситета, равного 600 мкм или 0.6 радиуса пузырька, время существования частицы на пузырьке резко снижается. Таким образом, критическим можно считать эксцентриситет столкновения, который превышает половину радиуса пузырька (при данном соотношении размеров пузырьков и частиц).

В работе [6] приведены экспериментальные данные исследования взаимодействия частиц и пузырьков в лабораторных условиях. Авторы определяли количество столкновений частиц и пузырьков, в результате которых произошло закрепление частиц. По этому значению косвенно можно оценить время существования флотационного комплекса.

Полученная при компьютерном моделировании зависимость времени от эксцентриситета (рис. 3) согласуется с экспериментальными данными, приведенными в работе [6].



Таким образом, чем больше эксцентриситет при столкновении, тем меньше время существования комплекса «минерал – пузырек».

Обработка данных моделирования позволила определить не только время нахождения частицы на пузырьке, но и угол, на который смещается

частица по поверхности пузырька с момента прикрепления до момента ее отрыва и разрушения образовавшегося флотационного комплекса, а также путь, пройденный частицей по поверхности пузырька (табл. 1).

Таблица 1 – Параметры скольжения частицы по поверхности воздушного пузырька

Эксцентриситет, мкм	Номер цикла разрушения флотокомплекса (округлено)	Угол смещения частицы до момента отрыва		Путь скольжения частицы по поверхности пузырька, мкм
		рад.	град.	
100	40 000	0.2458	14°5г	307
200	30 000	0.2246	12°52г	281
300	24 600	0.2105	12°4г	263
400	20 800	0.2035	11°40г	254
500	17 000	0.1745	10°	218
600	14 200	0.1612	9°14г	201
700	5 600	0.0735	4°13г	92
800	5 400	0.0698	4°	87
900	4 600	0.0628	3°36г	78
1000	4 600	0.0566	3°14г	71

Из представленных данных следует, что при увеличении эксцентриситета столкновения частицы и воздушного пузырька время существования флотационного комплекса снижается даже при условии первоначального закрепления частицы.

Выполненный анализ результатов моделирования и экспериментальных данных позволил установить следующие основные закономерности взаимодействия частиц и воздушных пузырьков в процессе флотации.

1. Проведенное исследование продемонстрировало приемлемое поведение компьютерной модели при моделировании отдельных стадий процесса взаимодействия фаз при флотационном обогащении и доказало ее эффективность.
2. С увеличением эксцентриситета столкновения возрастает тангенциальная составляющая скорости частицы и значительно снижается нормальная составляющая скорости, а также вероятность образования флотационного комплекса.
3. При увеличении эксцентриситета столкновения частицы и воздушного пузырька время существования флотационного

комплекса снижается даже при условии первоначального закрепления частицы.

4. Встреча частицы с пузырьком при угле менее критического (50° в данном случае) существенно увеличивает время существования и стабильности флотационного агрегата.

Список литературы

1. **Классен В. И., Мокроусов В. А.** Введение в теорию флотации. М: ГОНТИ 1953 –464 с.
2. **P. A. Cundall, O. D. L. Strack,** A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, **29:1**, 47–65 (1979).
3. **Звягильский Е. Л.** Изучение кинетики обрушения толщи над горизонтальными выработками мелкого заложения // Проблемы горного давления. – 1999. - № 2. – С. 17-29.
4. **Bruno M. S. et al.** 1996. Some influences of saturation and fluid flow on sand production: Laboratory and Discrete Element Model Investigations. SPE 36534, Proc. 1996 SPE Ann. Tech. Conf., Denver, Colorado, 6–9 October, 447–461.
5. **O'Connor P. M. et al.** Discrete Element Modeling of Sand Production *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* 1998. **34:3–4**, Paper No. 231.
6. **P. F. Whelan and D. J. Brown,** Particle-Bubble Attachment in Froth Flotation, *Bull. Inst. Min. a. Met.*, No 591, 593 (1956).
7. **Гарковенко Е. Е., Назимко Е. И., Самойлов А. И., Папушин Ю. Л.** Особенности флотации и обезвоживания тонкодисперсных углесодержащих материалов. Донецк: Норд-Пресс. – 2002. – 266 с.
8. **Емельянов Д. С.** Основы флотации углей. – Харьков: ХГУ, 1958. – 290 с.
9. **Митрофанов С. И.** Селективная флотация. – М.: Металлургиздат, - 1958. – 726 с.

Надійшла до редколегії 5.08.2003 р.