

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ФАЗ В ДИНАМИЧЕСКОЙ СРЕДЕ ПРИ ОБОГАЩЕНИИ МИНЕРАЛОВ

Основные технологии процессов обогащения связаны со взаимодействием фаз. Типичным примером может быть взаимодействие воздушных пузырьков с реагентами и минералами, благодаря чему происходит их флотация [1]. Эти взаимодействия представляют значительную трудность для исследования, т.к. они динамичны, находятся под влиянием большого массива физических и химических факторов и происходят в маленьком масштабе. Упомянутые выше процессы традиционно изучались с помощью лабораторных экспериментов. Эти испытания являются утомительными и требуют времени, хотя показывают неудовлетворительную точность. Аналитические исследования дают идеализированные результаты. Одним из мощных вариантов разрешения этой проблемы является численное моделирование, которое сочетает в себе динамику, точность и рассмотрение широкого спектра деталей.

В данной работе рассматривается компьютерная модель для моделирования кинетики взаимодействия фаз при обогащении, которая базируется на дискретных элементах. Модель принимает к рассмотрению эффект упругости твердого, воды и воздушной фазы, прочность связей между ними, динамическое сопротивление или демпфирование фаз, рассеивание кинетической энергии при столкновениях, силы тяжести, магнитные и 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 процессов обогащения. Разделяемые частицы имеют действительно комплексное поведение в процессах обогащения по сравнению с поведением массива пород. Они двигаются и подвергаются множественным актам слипания и разрушения флотационных комплексов. Эти процессы управляются физическими и химическими свойствами поверхности минералов и реагентов.

Рассмотрим пару минеральных частиц, взаимодействие которых представлено на рис. 1.

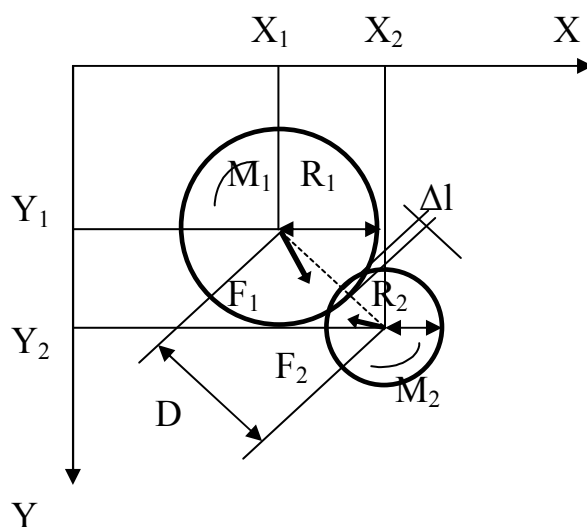


Рисунок 1 – Модель взаимодействия двух частиц

Частицы имеют шарообразную форму с радиусами R_1 и R_2 . Любая частица движется под действием силы (F_1 или F_2) и вращается в соответствии с законом Ньютона в прямоугольной системе координат X-Y, если она ускоряется моментами M_1 и M_2 . Движения разделяемых частиц рассматриваются в дискретные периоды времени. В компьютерной реализации эти периоды моделируются как циклы. Координаты центров тяжести X_1, Y_1 и X_2, Y_2 , скорости V_1 и V_2 , и силы являются постоянными и рассчитываются на каждом цикле. Более подробно работа модели описана в работе [7]. Модель позволяет рассчитывать приращение скорости частиц и параметры взаимодействия в различные моменты времени.

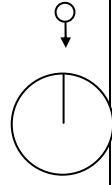
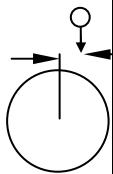
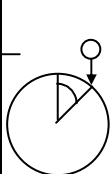
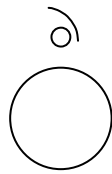
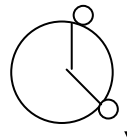
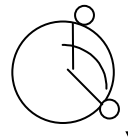
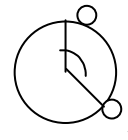
В течение каждого цикла смежные частицы проверяются на условия когезии и адгезии. Если частицы имеют приближение одна к другой на критическое расстояние, они слипаются между собой (две или несколько). Одновременно проверяются силы адгезии (когезии). Если они достигают определенных пределов, слипшиеся комплексы разрушаются.

Таким образом моделируется правдивое динамическое поведение минералов при их обогащении.

Перед использованием модели для исследования поведения флотационного комплекса она была проверена на взаимодействии двух частиц. Одна частица была угольной диаметром 0.5 мм и плотностью 1500 кг/м³, другая представляла собой воздушный пузырек диаметром 2,5 мм и плотностью 1.5 кг/м³. Были подобраны соответствующие коэффициенты для входящих в модель параметров (около 30) и граничных условий. Суммарно процесс взаимодействия был моделирован в течение 300 000 циклов. Цикл соответствовал 10⁻⁵ сек. Координаты центров тяжести частиц и состояние комплекса накапливалось в выходном файле каждые 5 000 циклов.

Угольная частица падала напротив воздушного пузырька с различными скоростью, эксцентриситетом и вращением. Все начальные условия для 10 испытаний представлены в первых четырех колонках табл. 1.

Таблица 1 - Исходные данные и результаты компьютерного моделирования взаимодействия частиц с пузырьком

№	Скорость, мм/с	Эксцентриситет, мм	Угол встречи, град	Скорость вращения частицы, рад/с	Время контакта, циклов	Угол контакта, град	Угол отрыва, град
1	13	0	0	0	(3), ∞	0	-
2	5	0	0	0	∞	0	-
3	5	0	0	25	70779	90	90
4	13	1,0	18	0	17392	15	33
5	5	1,0	18	0	∞	210	-
6	5	1,0	18	25	53932	102	120
7	13	2,0	40	0	15019	33	73
8	5	2,0	40	0	43610	80	120
9	13	2,5	55	0	13905	30	85
10	5	2,5	55	0	39586	35	90
							

Критические фрагменты, а именно акты встречи и разрушения или стабилизации представлены на рис. 2. Номер испытания напечатан выше фрагментов, текущий цикл моделирования показан под каждым фрагментом. Характеристики взаимодействующих частиц приведены в других колонках табл. 1. На фрагментах показано положение диаметров элементов и точки контакта частицы с пузырьком.

Эксперимент 1 моделировал центральное столкновение не вращающейся частицы, движущейся с высокой скоростью. Благодаря столкновению, частица тонула в пузырьке приблизительно на глубину ее диаметра и существовала на пузырьке (прикреплялась) в течение 3 циклов.

Затем частица на короткий момент времени отскакивала, т.к. упругая деформация превышала нормальный предел прочности. Однако, в конце частица прикреплялась к пузырьку достаточно надежно.

Эксперимент 2 моделирует столкновение частицы, движущейся со скоростью 5 мм/с. В результате угольная частица надежно прикрепилась к пузырьку. Однако, энергия вращения частицы не могла быть поглощена агрегатом, и он распался на 70779 цикле после контактирования в

эксперименте 3. Агрегат стал вращаться, и частица покинула пузырек при угле 90^0 . Это естественно, так как центробежная сила имела наибольшее значение в этом положении.

Рисунок 2 – Фрагменты взаимодействия угольной частицы и воздушного пузырька в различные моменты времени при моделировании

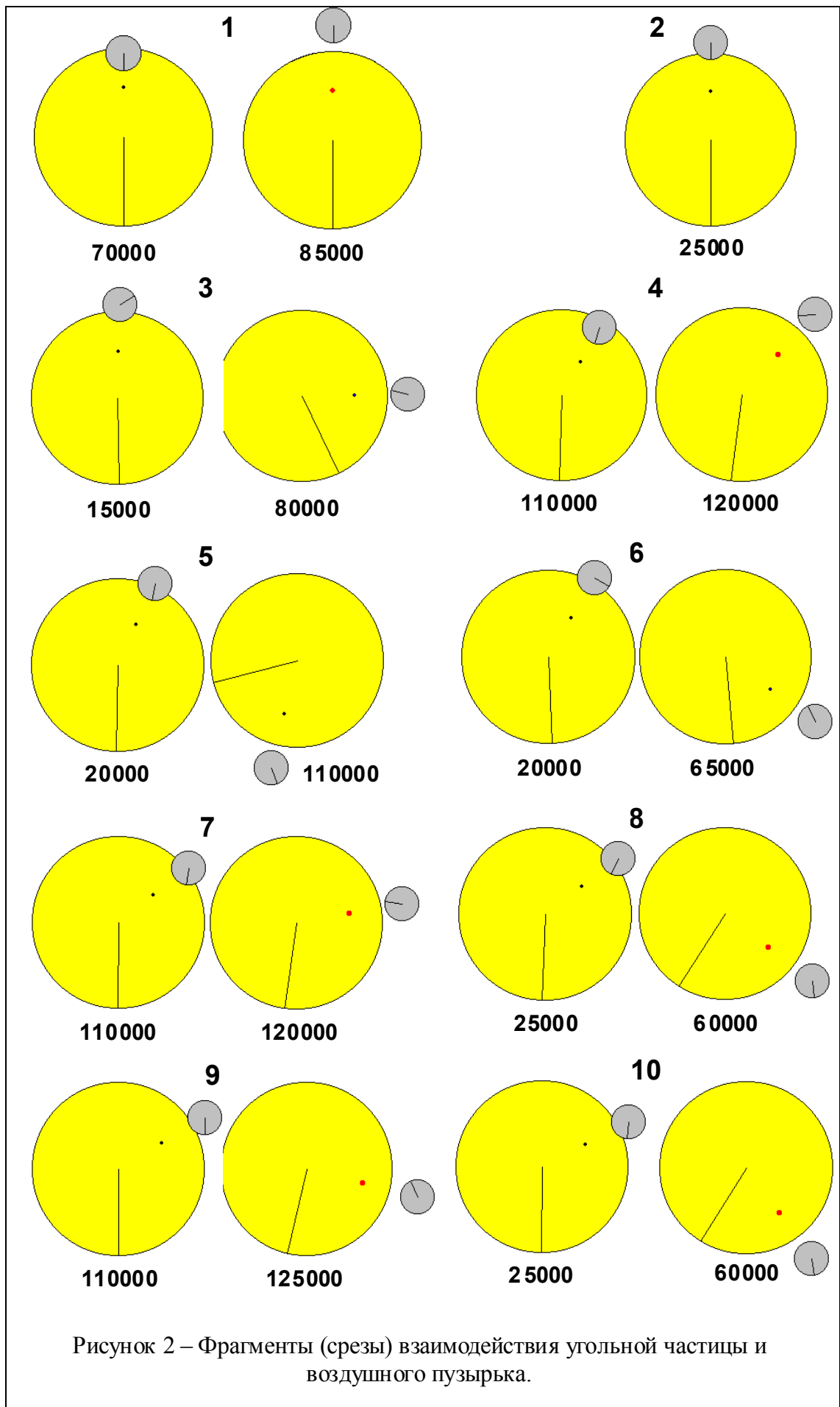


Рисунок 2 – Фрагменты (срезы) взаимодействия угольной частицы и воздушного пузырька.

Эксперимент 4 моделирует столкновение с эксцентриситетом и высокой скоростью, которая была критической для связи, т.к. агрегат разрушился после 17392 циклов.

Уместно сравнить результаты экспериментов 4 и 7, т.к. они отличаются только эксцентриситетом. Перемещение точки встречи до 2 мм или до 40° в испытании 7 в сравнении с 1 мм или 18° в испытании 4 уменьшило время прикрепления до 15019 циклов.

Эксперимент 5 продемонстрировал, что маленький эксцентриситет не является критическим фактором, если частица движется с небольшой скоростью. Как показывает эксперимент 5, угольная частица прикрепляется к пузырьку навсегда.

Однако, это оказывается невозможным, когда частица вращается (испытание 6). Флотационный комплекс существовал достаточно долго - в течение 53932 циклов, но в конце концов частица открепилась после поворота агрегата на угол 102° .

Эксцентриситет в 2 мм стал критическим для связи между частицей и пузырьком (испытание 8). Частица держалась на пузырьке в течение 43 610 циклов, но в конце концов оторвалась при повороте на угол 80° .

Высокая скорость столкновения и значительный эксцентриситет существенно уменьшил время пребывания частицы на пузырьке до 13 905 циклов (испытание 9).

Следует подчеркнуть, что большой эксцентриситет (2.5 мм) столкновения является превалирующим фактором, т.к. время существования частицы на пузырьке в 39586 циклов в испытании 10 является наименьшим среди остальных экспериментов, где моделировалась столкновение с низкой скоростью.

Представляется, что эксцентриситет является критическим фактором для закрепления частиц. Период закрепления изменяется в пределах: 70779 циклов до бесконечности для центрального столкновения; от 17392 циклов до бесконечности для смещения в 1.0 мм; от 15 019 до 43 610 циклов для смещения в 2.0 мм; от 13905 до 39586 циклов для смещения в 2.5 мм. Невозможно найти экспериментальные данные, чтобы проверить количественно результаты компьютерного моделирования, т.к. это превосходит современные возможности провести столь тонкий и точный физический эксперимент. Однако компьютерные эксперименты представляются разумными.

Whelan P. F. и Brown D. J. изучали элементарный акт взаимодействия частицы и пузырька при пенной флотации [6, 8]. Они регистрировали этот акт на киноплёнку. Результаты анализа представлены на рис. 3. Испытывались три минерала, а именно галенит, пирит и уголь. Частицы сталкивались с пузырьком с определенной скоростью. В ходе физического эксперимента получены следующие результаты. После столкновения нормальная скорость частиц значительно снижалась. При этом, чем больше смещение частицы

относительно центра пузырька, тем больше тангенциальная скорость частицы и меньше вероятность закрепления.

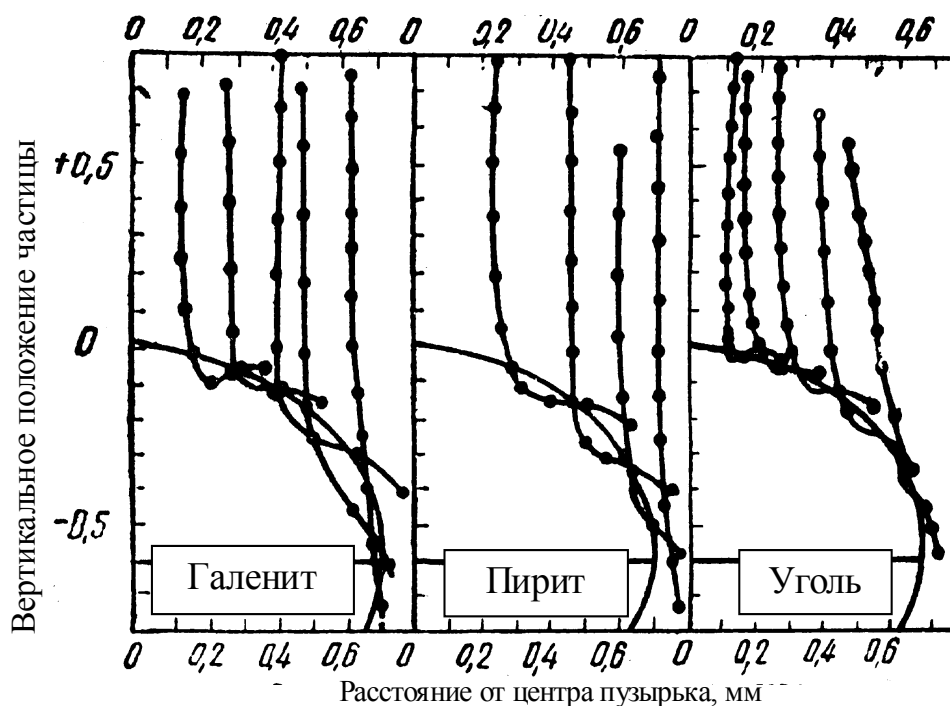


Рисунок 3 – Экспериментальная траектория движения частицы в течение контакта с воздушным пузырьком [7].
Рисунок 3 – Траектория движения частицы при контакте с воздушным пузырьком, полученная экспериментально [6]

Было выполнено компьютерное моделирование закрепления частиц на пузырьке для следующих условий. Угольная частица диаметром 0.29 мм тонула со скоростью 0.3 мм/с на воздушный пузырек диаметром 2 мм, всплывавший со скоростью 12 мм/с. Точка встречи смещалась относительно центра пузырька на 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 и 1000 микрон. Это смещение может быть рассмотрено как эксцентриситет относительно центра и направления силы тяжести.

Как следует из графиков, приведенных на рис. 4, рассчитанные при моделировании траектории аналогичны полученным экспериментально.

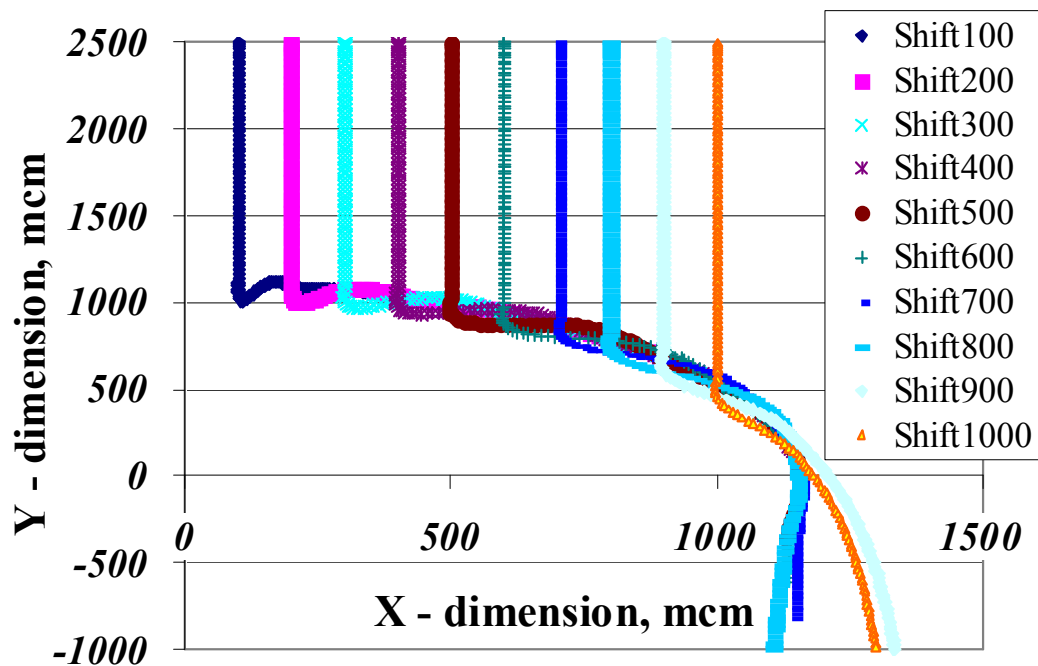


Рисунок 4 – Траектории движения частицы при столкновении с воздушным пузырьком, полученные при компьютерном моделировании

Таким образом, проведенные исследования кинетики взаимодействия фаз при флотационном обогащении путем компьютерного моделирования и сравнение результатов расчета и экспериментов показали приемлемую сходимость.

Компьютерная модель позволяет исследовать взаимодействие фаз при обогащении и принимает в рассмотрение влияние упругости твердой, водной и воздушной фаз, прочность связей между ними, динамическое сопротивление или торможение фаз, рассеяние кинетической энергии при столкновении, силу тяжести, перемещение, магнитные и центробежные силы, граничные и начальные условия.

Тангенциальная компонента скорости частицы возрастает с увеличением эксцентриситета между центром пузырька и точкой встречи с частицей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] S. S. Kim, B. I. Morsi, and S.-H. Chiang, Statistical Analysis of the Performance of a Selective Agglomeration Process Using n-heptane as Agglomerant, *Coal Preparation*, **15**, 51-70 (1994).

[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., John R. Torczynski Dale S. Preece; Justin T. Klosek; John R. Williams Discrete Element Modeling of Sand Production *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* **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] Е.Е. Гарковенко, Е.И. Назимко, А.И. Самойлов и др. Особенности флотации и обезвоживания тонкодисперсных углесодержащих материалов. – Донецк: Норд-пресс. – 2002. – 256 с.

[8] С.И. Митрофанов. Селективная флотация. М.: Metallurgizdat. - 1958. – 726 с.

Коротко об авторах:

Назимко Елена Ивановна – профессор, доктор технических наук, Донецкий Национальный технический университет, Украина

Друц Игорь Николаевич – соискатель, Донецкий Национальный технический университет, Украина