

УДК 622.7:519.711.2

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ
НА СЕЛЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ФЛОТАЦИИ.
Ч. 1. ВЛИЯНИЕ ДИАМЕТРА ПУЗЫРЬКА И ДИССИПАЦИИ ТУРБУЛЕНТНОЙ ЭНЕРГИИ**

В. Д. Самыгин¹, П. В. Григорьев²

¹*Национальный исследовательский технологический университет “МИСИС”,
E-mail: visamiguin@yandex.ru, Ленинский проспект, 4, 119049, г. Москва, Россия*

²*ООО “Инфорсер Инжиниринг”,
Рязанский проспект, 24, корп. 2, 109428, г. Москва, Россия*

Машинным экспериментом двух субпроцессов — захвата пузырьком и отрыва частиц, входящих в 36 фракций руды, отличающихся крупностью и содержанием меди, показано влияние диаметра пузырьков и энергии диссипации на селективность флотации. Степень концентрации достигала 80 при оптимальном диаметре пузырьков 265 мкм, которая выше в 5–8 раз, чем при диаметре пузырьков 1000–2000 мкм, характерном для импеллерных флотомашин.

Модель, селективность, флотация, пузырек, диссипация, субпроцесс, раскрытие

Основным методом управления селективностью процесса флотации является применение специально разработанных реагентных режимов для каждого типа сырья. Относительно мало изученной остается возможность регулирования селективности гидродинамическими факторами. Существующие оптимальные реагентные режимы не обеспечивают достаточной селективности разделения минералов с близкими флотационными свойствами. Теряется до 40% металлов при переработке медно-цинковых, медно-никелевых и других сульфидных полиметаллических руд. Большим резервом повышения скорости флотации является оптимизация гидродинамического режима [1–4]. К главным гидродинамическими факторам относят: размеры пузырьков и частиц [2, 5], расходы пульпы и воздуха [6], а также интенсивность турбулентной энергии [7–9].

Исследования многих авторов, проведенные на протяжении 80 лет, показали, что различия в значениях вероятности соударения с пузырьками воздуха частиц различной крупности достигают 200 раз, а вариации оптимального значения интенсивности турбулентности — трех порядков.

Наметилось новое направление, связанное с изучением влияния гидродинамических факторов не только на скорость флотации, но и на селективность процесса. Установлено, что наибольшая селективность наблюдалась в случае постепенного увеличения расхода воздуха от первых к конечным камерам импеллерной флотационной машины [10], а также при применении многозонной флотационной машины [11].

Цель работы — показать с помощью машинного эксперимента принципиальную возможность существенного повышения селективности процесса флотации регулированием гидродинамических факторов, влияющих только на субпроцессы захвата и отрыва частиц к пузырьку воздуха.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Субпроцессы прилипания и отрыва можно моделировать с помощью одно- и двухфазных моделей. В первом случае эти события происходят последовательно, а во втором — параллельно, т. е. независимо. При большом числе переходов частицы на пузырьки и обратно увеличивается селективность процесса. Нами расчеты проводились по однофазной модели, а влияние обратимости переходов по двухфазной модели [12]. Допускалась линейная взаимосвязь между содержанием гидрофобного минерала в частице и контактным краевым углом [13], а также однородность распределения турбулентной энергии в трехфазном потоке и не учитывалась сепарация в пенном слое.

Исходными данными служили гранулометрический и сростковый составы руды, размеры пузырьков воздуха и значение энергии диссипации. Модель позволяла определять влияние перечисленных факторов на константу скорости флотации каждой фракции, спектр флотиремости и кривые обогатимости.

Модельные эксперименты проводились на медной руде Алмалыкского месторождения, для которой имидж-анализом определен сростковый состав в 36 фракциях (таблица). Основная доля меди сосредоточена во 2-й (–10 мкм), 8-й и 9-й (–44 + 10 мкм), 17-й и 18-й (–100 + 44 мкм) и 26-й (–200 + 100 мкм) фракциях.

Взаимосвязь между краевым углом смачивания и массовой долей меди [13] представлялась линейной (рис. 1).

Извлечение $\varepsilon_i(t)$ и выход $\gamma_i(t)$ каждой из 36 фракций рассчитывались по уравнению Белогазова:

$$\varepsilon_i(t) = \varepsilon_i(1 - \exp(-K_i t)), \quad \gamma_i(t) = \gamma_i(1 - \exp(-K_i t)),$$

где $K_i = n_b k_i$ — константа скорости флотофракции, вычисляемая как интенсивность захвата частиц i -й фракции пузырьками, с^{-1} , n_b — концентрация пузырьков в единице объема, $1/\text{м}^3$, k_i — интенсивность захвата частиц i -й фракции объемом одного пузырька, $\text{м}^3/\text{с}$.

Интенсивностью захвата частиц называют произведение интенсивности соударения частиц на вероятность прилипания или адгезии [2, 5]. Газосодержание φ (объемная доля пузырьков в пульпе) принималось равным 0.2. Концентрация пузырьков вычислялась как $n_b = 6\varphi/\pi d_b^3$.

Для каждой i -й фракции выполнялось известное соотношение $\varepsilon_i \alpha = \gamma_i \beta_i$, где α и β_i — содержание в руде, которое равно $\alpha = 0.32 \pm 0.04 \%$, и в i -й фракции соответственно; ε_i и γ_i — доля меди и выход i -й фракции соответственно.

В рамках однофазных представлений захват частиц пузырьками и их отрыв рассматривались как последовательные события, тогда константа скорости $K = Z P_c P_a P_s$, где Z — частота соударения с объемом одного пузырька, $\text{м}^3/\text{с}$; P_c , P_a , P_s — вероятности соударения, прилипания и удержания соответственно. Для вычисления этих величин использованы следующие общепринятые выражения.

Значение Z для инерционных (крупных) объектов вычислялось по формуле [13]

$$Z = \sqrt{\frac{8\pi}{15}} \left(\frac{d_p + d_b}{2} \right)^3 \left(\frac{\varepsilon}{\nu} \right)^{1/2},$$

а для безынерционных (мелких) объектов

$$Z = 5.0 \left(\frac{d_p + d_b}{2} \right)^2 (\bar{U}_p'^2 + \bar{U}_b'^2).$$

Гранулометрический и сростковый состав фракций

Номер фракции	Выход фракции (доли·10 ⁶)	Массовая доля меди во фракции	Крупность, мкм	Плотность кг/м ³	Краевой угол, град	Распределение меди по фракциям, %
1	134730.00	0.000	– 10	2.65	5.00	0.00
2	1267.00	0.515	– 10	3.50	71.50	19.53
3	331380.00	0.000	– 44 + 10	2.65	5.00	0.00
4	0.02	0.068	– 44 + 10	2.74	10.25	Менее 0.01
5	1.11	0.156	– 44 + 10	2.86	20.75	0.01
6	14.00	0.279	– 44 + 10	3.05	43.50	0.12
7	89.27	0.372	– 44 + 10	3.21	59.25	0.99
8	697.66	0.498	– 44 + 10	3.46	69.75	10.40
9	2818.90	0.505	– 44 + 10	3.48	69.75	42.61
10	267670.00	0.000	– 100 + 44	2.65	5.00	Менее 0.01
11	2.50	0.281	– 100 + 44	3.05	43.50	0.02
12	0.01	0.011	– 100 + 44	2.66	6.75	Менее 0.01
13	0.81	0.065	– 100 + 44	2.73	10.25	Менее 0.01
14	9.09	0.151	– 100 + 44	2.85	20.75	0.04
15	32.72	0.270	– 100 + 44	3.04	43.50	0.26
16	127.63	0.391	– 100 + 44	3.25	62.75	1.49
17	559.80	0.528	– 100 + 44	3.52	71.50	8.85
18	600.18	0.537	– 100 + 44	3.54	73.25	9.65
19	194700.00	0.000	– 200 + 100	2.65	5.00	Менее 0.01
20	8.45	0.114	– 200 + 100	2.80	15.50	0.03
21	0.01	0.012	– 200 + 100	2.66	6.75	Менее 0.01
22	2.26	0.064	– 200 + 100	2.73	10.25	Менее 0.01
23	12.35	0.167	– 200 + 100	2.88	20.75	0.06
24	30.33	0.258	– 200 + 100	3.01	40.00	0.23
25	71.08	0.355	– 200 + 100	3.18	55.75	0.76
26	125.98	0.458	– 200 + 100	3.38	66.25	1.73
27	51.92	0.571	– 200 + 100	3.62	75.00	0.89
29	64731.00	0.000	– 300 + 200	2.65	5.00	Менее 0.01
30	37.35	0.213	– 300 + 200	2.94	29.50	0.24
30	0.05	0.016	– 300 + 200	2.67	6.75	0.00
31	17.23	0.071	– 300 + 200	2.74	10.25	0.04
32	46.18	0.159	– 300 + 200	2.86	20.75	0.22
33	42.26	0.264	– 300 + 200	3.03	40.00	0.33
34	42.41	0.326	– 300 + 200	3.13	52.25	0.41
35	63.80	0.471	– 300 + 200	3.40	66.25	0.90
36	19.56	0.327	– 300 + 200	3.13	52.25	0.19

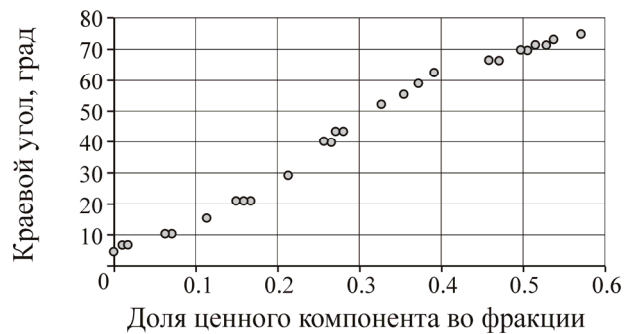


Рис. 1. Зависимость краевого угла от содержания ценного компонента во фракции

Для определения критического диаметра частицы или пузырька бралось соотношение

$$d_i^2 > d_{\text{crit}}^2 = \frac{15\mu_f \bar{U}_p'^2}{\rho_i \varepsilon},$$

в котором усредненная скорость турбулентных колебаний частицы или пузырька равна

$$\sqrt{\bar{U}_i'^2} = \frac{0.4\varepsilon^{4/9} d_i^{7/9}}{\nu^{1/3}} \left(\frac{\rho_i - \rho_f}{\rho_f} \right)^{2/3}.$$

Вероятность соударения рассчитывалась по [14]:

$$P_c = \left(1.5 + \frac{4}{15} \text{Re}_b^{0.72} \right) \frac{d_p^2}{d_b^2},$$

где критерий Рейнольдса для пузырька

$$\text{Re}_b = \frac{d_b \sqrt{\bar{U}_i'^2}}{\nu}.$$

Для вероятности прилипания использовалось выражение [15]

$$P_{ab} = \sin^2 \left(2 \arctan \exp \left[\frac{-(45 + 8 \text{Re}_b^{0.72} \sqrt{\bar{U}_i'^2} t_{\text{ind}})}{15 d_b (d_b / d_p + 1)} \right] \right),$$

где время индукции

$$t_{\text{ind}} = \frac{75}{\theta} d_p^{0.6}.$$

Вероятность удержания частиц на пузырьках воздуха вычислялась через критерий Бонда (Bo^*) [16]:

$$P_s = 1 - \exp \left[A_s \left(1 - \frac{1}{\text{Bo}^*} \right) \right],$$

$$\text{Bo}^* = \frac{d_p^2 \left[\Delta \rho_p g + 1.9 \rho_p \varepsilon^{2/3} \left(\frac{d_p}{2} + \frac{d_b}{2} \right) \right] + 1.5 d_p \left(\frac{4\gamma}{d_b} - d_b \rho_f g \right) \sin^2 \left(\pi - \frac{\theta}{2} \right)}{\left| 6\gamma \sin \left(\pi - \frac{\theta}{2} \right) \sin \left(\pi + \frac{\theta}{2} \right) \right|},$$

где $A_s = 0.5$ — постоянная; ε — интенсивность диссипации энергии турбулентности; $\gamma = 71 \cdot 10^{-3}$ Дж/м² — коэффициент поверхностного натяжения воды; θ — краевой угол смачивания; d_p и d_b — диаметры частиц и пузырьков соответственно; μ и ν — динамическая и кинематическая вязкость воды соответственно; ρ_f , ρ_b и ρ_p — плотность воды, газа пузырьков и частиц соответственно.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Следует отметить, что оптимальный диапазон размеров частиц для флотации ясен, а относительно оптимального размера пузырька общепринятое мнение отсутствует [1 – 10].

Влияние диаметра пузырьков. Установлено, что 36 крупностно-сростковые фракции в зависимости от диаметра пузырька и энергии диссипации образовывали от 5 до 12 флотофракций, отличающихся константой скорости флотации (интенсивностью K).

При увеличении диаметра пузырьков до 265 мкм число флотофракций возросло от 5 до 9, а при больших диаметрах 600 и 1500 мкм уменьшалось до 7 (рис. 2). При этом самый большой диапазон значений K от 0 до 14.5 с^{-1} или самый широкий спектр отмечен для пузырьков с диаметров 50 мкм.

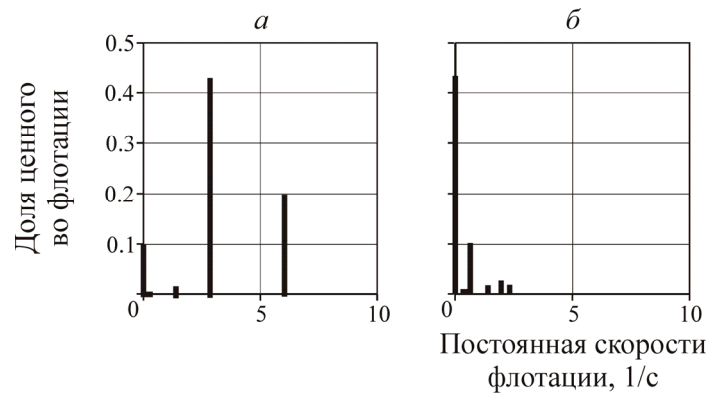


Рис. 2. Влияние диаметра пузырьков на спектр флотируемости при энергии диссипации 3.0 Вт/кг: а — 30 мкм; б — 1500 мкм

Значение константы скорости флотофракций K зависело от содержания меди в частице, ее размеров и диаметра пузырьков.

По результатам последних исследований зависимость константы скорости флотации от крупности частиц имеет экстремальный классический вид не только для частиц чистых минералов, но и для сростков с различной степенью раскрытия x , которая рассчитывалась как доля от максимального содержания ценного компонента в них. Снижение константы скорости флотации сростков k описывалось эмпирической зависимостью [17]

$$L = k / k_{\max} = ax \exp(bx^c),$$

где k / k_{\max} — отношение констант скорости для каждой степени раскрытия k к константе максимальной скорости k_{\max} для индивидуальных частиц минералов; x — степень раскрытия ($0 \leq x \leq 1$), b и c — константы.

По данным [17], при $x = 0.85, 0.55$ и 0.1 значение k / k_{\max} равнялось 0.4, 0.1 и 0.01 соответственно, т. е. скорость флотации богатых, рядовых и бедных сростков галенита снижалась в 2.5, 10 и 100 раз соответственно.

В исследуемой руде наиболее устойчивы с постоянной долей меди в спектрах (см. рис. 2) три флотофракции: K_{43} , K_{20} и K_{10} , в которых сосредоточено 43, 20 и 10% меди соответственно. Последние включали:

- K_{43} — раскрытые частицы с β_i меди от 40 до 53% в 6 фракциях (№ 9, 17, 18, 25 и 26) крупности от – 10 до – 100 мкм и частично богатые сростки из фракций № 15 (– 44 + 10 мкм);
- K_{20} — богатые сростки с β_i меди от 16 до 30%; из фракций № 15 (– 44 + 10 мкм), № 20, 24 (– 100 + 74 мкм), № 32 и 33 (– 200 + 100 мкм);
- K_{10} — рядовые сростки с β_i меди от 6 до 15% во фракциях крупности № 13 и № 14 (– 44 + 10 мкм), № 22 и № 23 (– 100 + 74 мкм), № 29, 30 и № 31 (– 200 + 100 мкм).

С увеличением размера пузырьков зависимость для флотофракций с K_{43} и K_{10} носила экстремальный характер, а с K_{20} — монотонно убывающий.

Максимальная константа скорости флотации ($K_{43} = 14.8 \text{ с}^{-1}$) наблюдалась при размере пузырьков 50 мкм, которая уменьшалась как с увеличением, так и с уменьшением диаметра пузырька. При меньшем диаметре пузырька 30 мкм ($K_{43} = 3.4 \text{ с}^{-1}$) смещалась на второе место (рис. 2), а с ростом размера пузырька от 50 до 1500 мкм скорость падала более чем в 10 раз и спектр сужался.

Для пузырька 30 мкм отмечалась максимальная константа скорости флотации $K_{20} = 7 \text{ с}^{-1}$, которая уменьшалась в 10 раз уже для пузырька 265 мкм.

Флотофракция с константой скорости флотации K_{10} имела максимальное значение для пузырька 265 мкм, равное 7 с^{-1} , и уменьшалась как с уменьшением (до 0.1 с^{-1}), так и с увеличением диаметра (до 1 с^{-1}).

При размере пузырьков 1500 мкм наибольшим значением K обладают частицы крупных фракций № 26, 27, 30, 33, 34. С увеличением диаметра пузырьков доля самой медленно флотируемой фракции увеличивалась в 4.5 раза, а скорость самой быстро флотируемой фракции уменьшалась в 4 раза. Таким образом, размер пузырьков вносил вклад в значение K , сравнимый с вкладом размера частиц и содержания меди.

Характер кривых обогатимости также существенно зависел от диаметра пузырьков (рис. 3а). Оптимальным являлся пузырек с диаметром 265 мкм, так как кривая 3 занимает самое верхнее положение во всем диапазоне качества концентрата и извлечения.

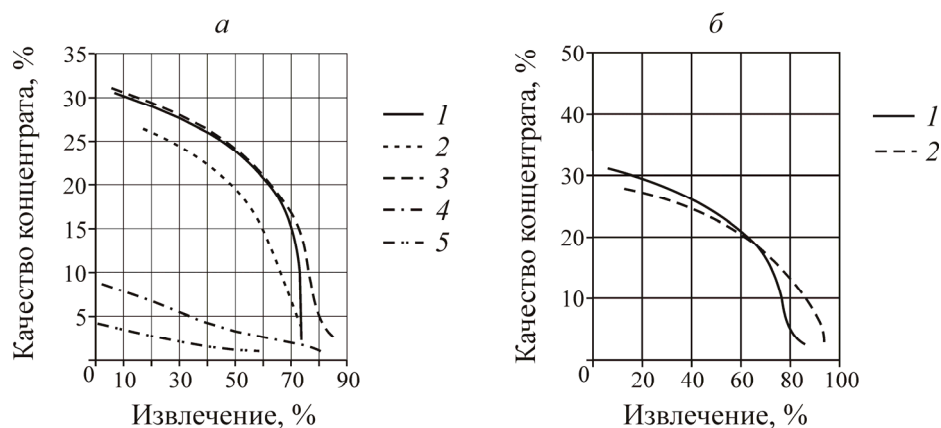


Рис. 3. Влияние на кривые обогатимости: а — диаметра пузырьков d_b , мкм: 1 — 30; 2 — 50; 3 — 265; 4 — 600; 5 — 1500; б — распределения пузырьков по диаметру: 1 — $d_b = 265$ мкм; 2 — смесь трех фракций пузырьков с $d_b = 30$ мкм — 24.23%; 50 — 52.84%; 265 мкм — 22.93%; энергия диссипации 3.0 Вт/кг

Следует отметить, что в большинстве флотационных машин, за исключением специальных, средний размер пузырька находится в диапазоне 1000–2000 мкм, для которых кривые обогатимости существенно хуже (рис. 3а, кривые 4 и 5) по сравнению с пузырьками меньшего диаметра (рис. 3а, кривые 1–3). При 80–90% извлечении содержание меди в концентрате лежит в пределах 3–5% при степени концентрации меди в 10–15 раз, которая для пузырька 265 мкм больше примерно в 3 раза. В связи с этим использование закономерностей, позволяющих управлять размером пузырьков [18, 19], является важным направлением управления процессом.

Только за счет использования пузырьков 265 мкм возможно получать 15% концентрат с извлечением около 70% (рис. 3а) при степени концентрации в 45 раз или богатых головок с 20–25% содержанием меди в концентрате при извлечении 50–60% и степени концентрации до 80 раз.

Исследовалось также влияние на кривые обогатимости (рис. 3б) распределения пузырьков по размерам, которое выбиралось таким образом, чтобы оптимальный диаметр пузырьков был для трех фракций руды с K_{43} , K_{20} и K_{10} , на которые приходилось основное распределение металла.

Применение смеси пузырьков оказывало двойное действие. До 65 % извлечения качество концентрата снижалось на 2–10 %, а в диапазоне извлечения от 65 до 95 % позволяло в 5–6 раз его повысить (рис. 3б).

Эффект селективности обусловлен применением мелких пузырьков, для которых увеличивалась в 3–5 раз скорость флотации не только богатых и рядовых сростков, а также бедных.

Влияние энергии диссипации. Влияние энергии диссипации исследовалось в диапазоне от 0.5 до 6 Вт/кг. С уменьшением менее 4.0 Вт/кг число фракций возрастало от 9 до 12. При этом спектры растягивались в сторону больших значений K от 4 до 14 с^{-1} .

При уменьшении энергии диссипации константа скорости флотации богатых фракций оптимальной флотационной крупности № 17, 18 (–100 + 44 мкм) при размере пузырьков 265 мкм устойчиво растет. При этом влияние на константу скорости флотации других фракций заметно меньше.

Оптимальное значение энергии диссипации определялось главным образом крупностью минеральных частиц.

ВЫВОДЫ

Моделированием только двух субпроцессов захвата пузырьком и отрыва частиц, входящих в 36 фракций руды, отличающихся крупностью и содержанием меди, показано влияние диаметра пузырьков и энергии диссипации на селективность флотации.

Степень концентрации достигала 80 при оптимальном диаметре пузырьков 265 мкм, которая выше в 5–8 раз, чем при диаметре пузырьков 1000–2000 мкм, характерном для импеллерных флотомашин.

Эффект селективности проявлялся через деформацию спектра, которая заключалась в изменении константы скорости флотофракций, а также в смещении их порядка относительно друг друга. Эта закономерность в зависимости от диаметра пузырька и энергии диссипации носила экстремальный и монотонный характер, число флотофракций изменялось от 5 до 12. При этом спектры растягивались или сужались в диапазоне K от 0 до 14 с^{-1} .

Максимальная константа скорости флотации наблюдалась при пузырьке диаметром 50 мкм для фракции, содержащей раскрытые частицы и богатые сростки оптимальной крупности с массовой долей меди от 40 до 53 %, и зависела от степени раскрытия сростков и соотношения размеров частиц и пузырьков, а также энергии диссипации. Вклад размера пузырьков в значение K сопоставим с вкладом других гидродинамических факторов.

Для каждой минеральной фракции руды, характеризующейся размером частиц и долей ценного минерала, существовал свой оптимальный диаметр пузырьков. Распределение пузырьков по диаметру должно соответствовать фракционному составу руды. Для существующего фракционного состава руды всегда можно подобрать диаметр пузырька, при котором наблюдается наилучшая кривая обогатимости. Для исследуемой руды диаметр равен 265 мкм.

Применение смеси пузырьков позволяло повышать качество концентрата, если для фракций руды, на которые приходилось основное распределение металла, использовали оптимальный диаметр пузырьков с максимальной константой скорости флотации (интенсивностью).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Митрофанов С. И.** Влияние скорости протекания пульпы на скорость и селективность флотации // Цв. металлургия. — 1941. — № 17.
2. **Rubinstein J. B., Samigyn V. D.** Effect of particle and bubble size on flotation kinetics, In Frothing in flotation, London: Gordon and breath, 1998, Vol. 2.
3. **Schubert H., Bischofberger C.** On the optimization of hydrodynamics in flotation processes, Proceedings of the 13th International Mineral Processing Congress, 1979, Vol. 2.
4. **Massinaei M., Kolahdoozan M., Noaparast M., Oliazadeh M., Yianatos J., Shamsadini R., Yarahmadi M.** Hydrodynamic and metallurgical characterization of industrial columns in rougher circuit, Minerals Engineering, 2009, Vol. 22.
5. **Dobby G. S., Finch J. A.** Mixing characteristics of industrial flotation columns, Chemical Engineering Science, 1985, Vol. 40 (7).
6. **Finch J. A., Dobby G. S.** Column flotation, Oxford: Pergamon, 1990.
7. **Changunda K. Deglon, Harris M.** Investigating the effect of energy input on flotation kinetics in an oscillating grid flotation cell, Minerals Engineering, 2008, Vol. 21.
8. **Rulyov N. N.** Turbulent microflotation of ultrafine minerals, Mineral Processing and Extractive, Metallurgy, 2008, Vol. 117, No. 1.
9. **Massinaei M.** Mixing characteristics of industrial columns in rougher circuit, Minerals Engineering, 2007, Vol. 20.
10. **Aslan A., Boz H.** Effect of air distribution profile on selectivity at zinc cleaner circuit, Minerals Engineering, 2010, Vol. 23, No. 11–13.
11. **Samyguin V., Filippov L., Matinin A., Lekhatinov Ch., and Tertyshnikov M.** New multiple-zone flotation cell – device for increasing separation selectivity. Proceedings of the XV Balkan Mineral Processing Congress (BMPC 2013), I. Nishkov, I. Grigorova and D. Mochev Eds, Sofia: Publishing House St. Ivan Rilski, ISBN 978-954-353-217-9, 2013, Vol. 2.
12. **Goryachev B. Y., Nikolaev A. A., Plyina E. Y.** Analysis of flotation kinetics of particles with the controllable hydrophobic behavior, Journal of Mining Science 2010, 46.
13. **Koh P. T. L., Schwarts M. P.** CFD modelling of bubble–particle attachments in flotation cells, Mineral Engineering, 2006, Vol. 19.
14. **Yoon R. H., Luttrell G. H.** The effect of bubble size on fine particle flotation, Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 1989, Vol. 5.
15. **Dai Z., Fornasiero D., Ralston J.** Particle–bubble attachment in mineral flotation, Journal Colloid and Interface Science, 1999, Vol. 217, No. 1.
16. **Schulze H. J.** Hydrodynamics of bubble–mineral particle collisions, Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 1989, Vol. 5.
17. **Jameson G. J.** The effect of surface liberation and particle size on flotation rate constants, Minerals Engineering, 2012, Vol. 36–38.
18. **Кондратьев С. А.** Исследование процесса дробления газовых пузырьков в турбулентном потоке жидкости // ФТПРПИ. — 1987. — № 5.
19. **Кондратьев С. А., Бочкарев Г. Р.** О стабилизации размера пузырьков в камере флотационной машины // ФТПРПИ. — 1998. — № 3.

Поступила в редакцию 15/X 2014