

## К вопросу выбора соотношения компонентов смеси реагентов при флотации

*Д.В. Семьянова<sup>1\*</sup>*

<sup>1</sup>Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения РАН,  
г. Новосибирск, Российская Федерация

\* e-mail: d.semjanova@yandex.ru

**Аннотация.** Совершенствование реагентного режима является одним из доступных и распространенных способов, позволяющих повысить эффективность флотационного процесса. Научные данные подтверждают перспективность применения комбинации реагентов. Использование сочетания реагентов при флотации имеет ряд преимуществ, как повышение извлечения, качества разделения компонентов, снижение расходов реагентов и др. В связи с этим актуальным является вопрос о выборе реагентов и их соотношений при составлении комбинаций. В настоящей работе, с учетом предложенного ранее механизма действия физической формы сорбции, который объясняет связь флотационной активности с поверхностным натяжением, предложено при составлении комбинации реагентов учитывать дополнительно параметр взаимодействия. Это позволит использовать смесь в таком соотношении компонентов, которое обеспечит синергетический эффект на границе раздела «газ-жидкость».

**Ключевые слова:** флотация, комбинация реагентов, синергетический эффект, физическая форма сорбции реагента

## Selecting ratios of chemical agents for flotation mixtures

*D. V. Semyanova<sup>1\*</sup>*

<sup>1</sup>Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk,  
Russian Federation

\*e-mail: d.semjanova@yandex.ru

**Abstract.** Improvement of a reagent mode is one of the common affordable methods of stimulating flotation efficiency. The present scientific knowledge proves the promising nature of combining chemical agents. The combinations of flotation agents are advantageous for the increased recovery, higher separation quality, reduced consumption of reagents, etc. In this regard, it is of the current concern to elaborate the methods to select reagents and to determine their ratios for composing efficient combinations. This paper, using the earlier proposed physisorption mechanism which explains correlation of flotation activity and surface tension, suggests combining chemical agents with regard to an interaction parameter. This can make it possible to mixture components at such ratio that ensures the synergistic effect at the gas-liquid interface.

**Keywords:** flotation, combination of reagents, synergistic effect, physisorption of agents

### *Введение*

Синергетический эффект при использовании комбинации реагентов проявляется не только в их коадсорбции на минеральной поверхности и повышении её гидрофобных свойств [1–3], но и при сорбции реагентов на границе «газ-жидкость» [4, 5] и снижении поверхностного натяжения. Связь низкого значения поверхностного натяжения и, как следствие, высокого поверхностного давления

с собирательной способностью рассматривалась в работах [6, 7] и объяснена с помощью предложенного механизма действия физической формы сорбции реагента.

Авторы [8] исследовали применение комбинации реагентов: олеата натрия и додециламмоний хлорида для флотации сподумена. Исходя из результатов флотационных экспериментов оптимальным является соотношение компонентов 9:1. Так же были вычислены параметр взаимодействия и коэффициенты активности, которые показали синергетический эффект на границе раздела «газ-жидкость». Максимальный синергетический эффект обнаружен при мольной фракции додециламмоний хлорида равной 0,5 в смеси олеат натрия/додециламмоний хлорид.

В [5] отмечено, что теория регулярных растворов и определение поверхностного натяжения успешно применяется для описания характеристик смешанных растворов поверхностно-активных веществ (ПАВ). Параметр взаимодействия  $\beta$  связан с изменением поверхностной энергии при смешивании двух ПАВ:  $\Delta G_{\text{mix}} = \beta X(1-X)RT$ . Более отрицательное значение  $\beta$  смешанной системы указывает на более сильное притяжение и синергизм между ПАВ. В работе приведены результаты экспериментов по определению параметра взаимодействия для комбинаций таких реагентов как тетрадецилтриметиламмоний бромид и натриевые соли сульфоновой кислоты (длина углеводородного фрагмента – 12, 14, 16). При использовании комбинации реагентов отмечен синергетический эффект в снижении поверхностного натяжения. Отрицательные значения параметра взаимодействия также указывают на синергизм при формировании смешанной системы. При этом, в результате экспериментов по определению контактного угла на частице кремния, максимальное его значение установлено для индивидуального катионного реагента, но не для композиции.

Согласно литературным данным, важную роль при составлении комбинации реагентов играет длина углеводородного фрагмента одного компонента относительно другого [5, 9]. В [5] установлено, что наименьшее значение поверхностного натяжения получено в случае использования смеси, состоящей из реагентов с одной длиной углеводородного фрагмента.

Целью настоящей работы является оценка применимости параметра взаимодействия при выборе соотношения компонентов смеси реагентов. К задачам настоящей работы относятся: проведение экспериментов по определению скорости растекания рассматриваемых комбинаций реагентов; проведение флотационных экспериментов; установление связи между параметром взаимодействия и результатами полученных экспериментов.

### ***Методы и материалы***

В работе использовали реагенты фирмы «Sigma Aldrich» (чистота 98%). Общая концентрация  $C$  растворов смесей составляла  $9 \cdot 10^{-4}$  моль/л. Мольное соотношение компонентов ( $\alpha$ ) в смесях 0,2; 0,5 и 0,8. Регулирование pH проводилось с помощью 1% раствора NaOH. Скорость растекания растворов реагентов определяли методом физического моделирования с помощью съемки высокоскорост-

ной камерой EverCam 1000-16-C (7000 кадров/с). Флотационные эксперименты проводились на флюоритовой руде Ярославского ГОКа. Химический состав руды:  $\text{CaF}_2$  – 24.39%,  $\text{CaCO}_3$  – 9.15%,  $\text{SiO}_2$  – 29.62%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 16.03%,  $\text{MgO}$  – 11.65%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 4.53%,  $\text{K}_2\text{O}$  – 3.22%,  $\text{Na}_2\text{O}$  – 1.62%. Руда измельчалась до содержания класса -0,044 мм 88% в рольганговой мельнице при Т:Ж:Ш=1:1:7. Опыты проводились на навесках 50 г в лабораторной машине с объемом камеры 300 мл. Время агитации с комбинацией собирателей – 5 мин; время флотации – 5 мин.

### Результаты

Значения параметров взаимодействия представлены в таблице 1, детально вычисление параметра  $\beta$ , а также изотермы поверхностного натяжения представлены в работе [10].

Таблица 1

Характеристики смешанного мицеллообразования в бинарном растворе ПАВ: гексадецилтриметиламмоний бромид (компонент 1) – лаурилсаркозинат натрия (компонент 2)

$\alpha_1$	ККМ смеси, моль/л		$x_1^m$		$\beta_m$
	Идеал.	Экспер.	Идеал.	Экспер.	
0.2	0.003	0.0028	0.74	0.68	-0.87
0.5	0.0016	0.0007	0.92	0.67	-5.00
0.8	0.0011	0.0008	0.98	0.81	-9.51

На рисунке представлены данные по скорости растекания по поверхности воды комбинаций реагентов в соотношениях: 0,2; 0,5 и 0,8.

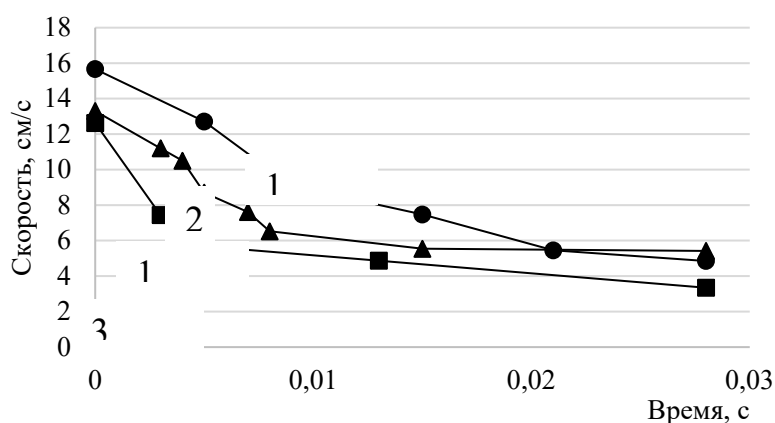


Рисунок – скорость растекания растворов комбинации реагентов в определенном соотношении ( $\alpha$ ) в зависимости от времени, где 1)  $\alpha=0,8$ ; 2)  $\alpha=0,5$ ; 3)  $\alpha=0,2$

В таблице 2 представлены результаты флотационных экспериментов флюоритовой руды комбинациями реагентов.

## Результаты флотационных экспериментов

№	Наименование	Выход, %	Содержание, %		Извлечение, %		Примечание
			CaCO <sub>3</sub>	CaF <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	CaF <sub>2</sub>	
1	Пенный продукт	38,46	10,48	27,0	44,71	44,54	$\alpha=0,5$
	Камерный продукт	61,54	8,1	21,01	55,29	55,46	
	Итого	100,00	9,02	23,31	100,0	100,0	
2	Пенный продукт	73,96	9,31	27,09	83,94	90,62	$\alpha=0,8$
	Камерный продукт	26,04	5,06	7,96	16,06	9,38	
	Итого	100,00	8,2	22,11	100,0	100,0	
3	Пенный продукт	59,84	10,73	31,06	75,07	86,25	$\alpha=0,2$
	Камерный продукт	40,16	5,31	7,38	24,93	13,75	
	Итого	100,00	8,55	21,55	100,0	100,0	

**Обсуждение**

Согласно полученным результатам на всем диапазоне рассмотренных соотношений параметр  $\beta$  отрицательный, что свидетельствует о синергизме совместного действия рассмотренных компонентов смеси. Изменение скорости растекания растворов комбинаций реагентов по поверхности воды коррелирует с изменением параметра взаимодействия. Корреляционная связь между данными по параметру взаимодействия, скорости растекания и извлечения полезного компонента несколько нарушена для  $\alpha=0,5$ .

**Заключение**

Для выбора соотношений двух поверхностно-активных реагентов при составлении комбинации дополнительно может быть использован параметр взаимодействия  $\beta$ , т.к. он характеризует синергетический эффект от использования комбинации реагентов при снижении поверхностного натяжения. Согласно механизму действия физической формы сорбции, низкое значение поверхностного натяжения и высокая скорость растекания по поверхности воды сокращают время индукции при формировании флотационного комплекса и характерны для реагентов с большей флотационной активностью. Следовательно, выбор комбинации реагентов в таком соотношении компонентов, для которого характерно низкое значение параметра взаимодействия и высокая скорость растекания, предпочтителен.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Курков А.В., Щербакова С.Н., Горохов И.Н., Пастухова И.В. Применение фосфоорганических соединений в качестве дополнительных реагентов при флотации несulfидных руд // Доклад на симпозиуме «Неделя горняка – 98», Москва, МГТУ, с.113-118.
2. Filippova I.V., Filippov L.O., Duverger A., Severov V.V. Synergetic effect of a mixture of anionic and nonionic reagents: Ca mineral contrast separation by flotation at neutral pH // Minerals Engineering. – 2014.
3. Ejtemaei M., Irannajad M., Gharabaghi M. Influence of important factors on flotation of zinc oxide mineral using cationic, anionic and mixed (cationic/anionic) collectors // Minerals Engineering, 2011, 24, P.1402-1408.

4. Pienaar D., McFadzean B., O'Connor C. Molecular interactions between thiol collectors and non-ionic frothers in mixed monolayers at the air-water interface using a regular solution theory approach // IMPC 2020 International Mineral Processing Congress, Cape Town, South Africa. – P.2033-2043.
5. Alexandrova L., Hanumantha Rao K., Forsberg K.S.E., Grigorov L., Pugh R.J. The influence of mixed cationic-anionic surfactants on the three-phase contact parameters in silica-solution systems // Colloids and surfaces A: physicochemical and engineering aspects. – 2011. – V. 373. – P.145-151.
6. Кондратьев, С.А. Реагенты-собиратели в элементарном акте флотации / С.А. Кондратьев. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. – 241 с.
7. Кондратьев, С.А. Физическая форма сорбции реагента и ее назначение во флотации / С.А. Кондратьев. – Новосибирск: Наука, 2018. – 184с.
8. Tian J., Xu L., Deng W., Jiang H., Gao Z., Hu Y. Adsorption mechanism of new anionic/cationic collectors in a spodumene-feldspar system // Chemical Engineering Science. –2017. – P. 99 – 107.
9. Yang F., Long S.S. Synergistic effect of mixed fatty acids in flotation of sheelite from calcite// IMPC 2020 International Mineral Processing Congress, Cape Town, South Africa. – P.1081-1090.
10. Семьянова Д.В. Синергетический эффект комбинации собирателей при адсорбции на границе «газ-жидкость» // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVII Междунар. научн. конгр.: сб.материалов в 8 т. Т.2. – Н.: СГУГиТ, 2021. №4. С. 116 – 122.

© Д. В. Семьянова, 2022