

УДК 622.7

**ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ПРИ ВЫБОРЕ КОМБИНАЦИИ ФЛОТАЦИОННЫХ РЕАГЕНТОВ**

Д. В. Семьянова, С. А. Кондратьев

*Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН,
E-mail: d.semjanova@yandex.ru, Красный проспект 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Применение композиции собирателей — одно из перспективных направлений интенсификации флотационного процесса. При использовании смеси реагентов синергетический эффект от их взаимодействия проявляется не только на границе раздела фаз “минерал – жидкость”, но и на границе раздела “газ – жидкость”. Настоящая работа направлена на установление связи синергетического эффекта в понижении поверхностного натяжения комбинации катионного и анионного собирателей и синергизма этих реагентов во флотации. Проведены эксперименты по определению поверхностной активности физической формы сорбции при сочетании реагентов. Результаты сопоставлены с флотационной активностью комбинации и параметром взаимодействия компонентов смеси. Полученные данные послужат основой формирования расчетного метода подбора комбинации собирателей для флотационного обогащения.

Флотация, комбинация реагентов, синергетический эффект, физическая форма сорбции, поверхностное натяжение раствора

DOI: 10.15372/FTPRPI20240615
EDN: DZSYEM

Продолжительное время исследователи в области флотационного процесса одним из перспективных направлений его интенсификации считают использование комбинации реагентов-собирателей [1]. Благодаря применению смесей реагентов отмечаются следующие положительные изменения: рост извлечения полезного компонента, улучшение адсорбции основного собирателя на минеральной поверхности и повышение селективности адсорбции [2]. Основной целью использования комбинации реагентов является обеспечение синергизма действия их смеси, например в результате получения надмолекулярных структур [1]. Синергетический эффект возникает, когда комбинация продуктов превышает эффективность в сравнении со взвешенной суммой их индивидуальных эффектов [3]. При этом анализ синергетического действия композиций флотационных реагентов сложен и зависит от химического взаимодействия между используемыми реагентами. Каждый реагент в смеси может сохранять свой химический состав, или при смешивании возможно образование новых соединений [4].

Во многих работах повышение эффективности флотации с применением комбинации реагентов объясняют увеличением общей плотности адсорбционного слоя на минеральной поверхности [5–9], в результате чего повышается ее гидрофобность и, следовательно, извлечение полезного компонента.

В [8] обобщены данные последних исследований процессов флотации и адсорбции смесей собирателей на оксидных и силикатных минералах. В случае комбинации анионного и катионного реагентов уменьшение силы электростатического отталкивания между адсорбированными молекулами собирателя, вызванное присутствием противоположно заряженного реагента, и их совместная адсорбция значительно увеличивают количество собирателей, закрепленных на поверхности минералов.

Авторами [9] проведена работа по детальному изучению текущей ситуации во флотации кальцитовых руд. Рассмотрены реагенты, применяемые во флотации, преимущества и недостатки анионной прямой флотации, катионной обратной флотации и комбинации реагентов при прямой флотации. Показано, что большинство исследований рассматривают анионный и неионогенный реагенты, для которых характерен синергетический механизм адсорбции. Отмечено, что путем добавления неионогенных поверхностно-активных веществ (ПАВ) происходит общее снижение количества применяемых реагентов в смеси.

В ряде работ рассматривается сочетание различных собирателей, которое часто приводит к синергии их влияния на свойства исследуемой системы: критическую концентрацию мицеллообразования (ККМ) и поверхностное натяжение [10–13]. В [11] приведена значительная корреляция между синергизмом образования мицелл в смесях поверхностно-активных веществ и рядом физико-химических свойств, таких как эмульгирующих, диспергирующих, смачивающих и др. Установлено, что синергизм при использовании сочетания реагентов проявляется на всех границах раздела фаз: “жидкость–газ”, “жидкость–жидкость”, “жидкость–твердая фаза”. Характерным его свойством для различных процессов, включая флотационный, является одинаковое соотношение концентраций компонентов собирателей в смеси.

Исследователями [3] доказан аддитивный эффект от смеси реагентов эфирмоноамина и эфирдиамина в снижении поверхностного натяжения, а применение смеси этих реагентов в соотношении 1 : 1 дало более высокое извлечение при флотации кварца в сравнении с индивидуальными реагентами и подтвердило наличие синергетического эффекта.

В [12] проведены эксперименты по флотации каолинита с использованием в качестве собирателей различных комбинаций таких реагентов, как октановая, декановая, додекановая кислоты и додециламмоний хлорид. Извлечение ценного компонента при флотации додециламмоний хлоридом составило 60.86 %. Применение смеси реагентов додециламмоний хлорида и октановой кислоты, а также их совместная сорбция на минеральной поверхности привели к повышению этого показателя до 85.47 %. Отмечено также, что поверхностное натяжение растворов смеси ниже, чем индивидуальных реагентов, что способствует формированию более мелких пузырьков и, как результат, положительно влияет на флотационный процесс.

В ряде работ для оценки синергетического эффекта бинарной смеси рассчитывают параметр взаимодействия [13–19]. По мнению авторов [8], из всех возможных теорий, описывающих поведение смешанных систем, теория Рубина и Розена является общепринятой и используется для изучения неидеальных взаимодействий между ПАВ в воде и на границе раздела фаз. В [15] изучалось влияние на флотацию взаимодействия между молекулами собирателя и вспенивателя, возникновение синергетического эффекта, а также оценива-

лись результаты изменения строения и структуры реагентов. При этом параметр β применялся для отражения количественной информации о взаимодействии между компонентами в смеси ПАВ.

Образование тонких смачивающих пленок на поверхности кремнезема из водных растворов катионного реагента (тетрадецилтриметиламмоний бромида) и его смеси с анионными алкилсульфонатами натрия (с длиной углеводородного фрагмента C12, C14 и C16) изучено в [13]. В результате электростатического взаимодействия между катионными и анионными соединениями, входящими в состав смеси, в адсорбционном слое на границе раздела “газ – жидкость” и “твердое – жидкость” формируются специфические структуры. Отмечено, что смешивание катионных и анионных реагентов дает синергетический эффект в снижении поверхностного натяжения, что согласуется с вычисленным параметром взаимодействия. Оптимально, по мнению авторов, использовать реагенты с равными длинами углеводородного радикала. В этом случае синергетический эффект будет максимальным из-за латеральных молекулярных взаимодействий, в отличие от ситуации, когда длина углеводородных фрагментов различна — пространство между двумя молекулами ПАВ больше.

В [17] показано, что применение комбинации реагентов, состоящей из катионного (додециламмоний хлорида) и анионного (олеата натрия) собирателей в мольном соотношении 9 : 1, повысило селективность разделения сподумена и полевого шпата в сравнении с индивидуальным использованием указанных реагентов. Проведены эксперименты по определению поверхностного натяжения растворов реагентов, вычислен параметр взаимодействия, согласно которому максимальный синергетический эффект наблюдается при мольном соотношении 1 : 1.

Исследователями [18] проведено вычисление параметров поверхностной активности бинарных растворов моноалкиламидов дикарбоновых кислот и бутилового ксантогената. Значение параметра взаимодействия на всем диапазоне соотношений компонентов в смеси удовлетворяет выполнению условий синергизма при мицеллообразовании, что подтверждает усиление совместного действия исследуемых компонентов. Результаты проведенных флотационных экспериментов свидетельствуют о том, что вычисленные параметры поверхностной активности коррелируют с полученными показателями черного медно-никелевого концентрата.

Другое объяснение повышения эффективности флотационного процесса при использовании комбинации реагентов дано в работах [20–23]. В его основе предложенный ранее механизм, согласно которому функцию снятия кинетических ограничений при образовании флотационного комплекса выполняет физическая, десорбируемая с минеральной поверхности форма сорбции реагента, активная на границе раздела фаз “газ – жидкость”. В зависимости от природы собирателя функцию указанной формы сорбции выполняют различные соединения — ионно-молекулярные ассоциаты, молекулы, при комбинации реагентов — один из компонентов смеси.

Автор [20] полагает, что работа растекания пленки, представленной сочетанием собирателей, их поверхностно-активных форм, является критерием выбора сочетания собирателей. Один из реагентов играет роль хемосорбированного собирателя, отвечающего за селективность процесса, а второй реагент — физической формы сорбции. Иллюстрация действия работы такого механизма приведена в [22, 23]: ксантогенат в сочетании с угольным реагентом Флотэк для флотации свинцово-цинковой руды и оксигидрильный реагент с реагентом Флотэк для флотации апатитовой руды. В результате использования комбинации реагентов извлечение повысилось и составило для свинца 79.9 %, для цинка — 66.3 % в случае свинцово-цинковой руды; в случае апатитовой руды извлечение P_2O_5 выросло и составило 78.33 %, содержание — 27.33 %. По мнению авторов, в рассматриваемых композициях ксантогенат или оксигидриль-

ный реагент выполняет функцию химически закрепившегося собирателя, а реагент Флотэк, обладая высокой поверхностной активностью и скоростью растекания, — функцию физической формы сорбции, десорбируемой в момент прорыва прослойки жидкости.

В [24] выполнялась флотация фосфатов комбинацией реагентов: олеатом натрия и оксиэтилированным нонилфенолом с четырьмя этиленоксидными (C_2H_4O) группами. При использовании смеси реагентов извлечение полезного компонента повысилось, но было установлено, что адсорбция олеата натрия на апатите снизилась. Авторы объяснили этот факт конкурирующей адсорбцией между двумя реагентами.

В [25] отмечено, что прирост флотоактивности для шеелита и кальцита в присутствии аполярного реагента происходит без увеличения адсорбции собирателя, а малополярные оксиэтилированные спирты (неонолы) на шеелите выполняют функцию снятия кинетического ограничения образованию флотационного контакта, т. е. играют роль физической формы сорбции. По аналогии с этим можно предположить, что и в работе [24] неионогенный собиратель выполнял функцию физической формы сорбции, поэтому, несмотря на снижение адсорбции олеата натрия на поверхности минерала, наблюдался рост извлечения полезного компонента.

В [20–23] показано, что в зависимости от природы реагента функцию физической формы сорбции выполняют различные соединения, их поверхностно-активные формы. Следовательно, при составлении комбинации реагентов и оценке эффективности ее использования, важно принимать во внимание, какие именно компоненты входят в композицию, например анионный и неионогенный собиратели или анионный и катионный реагент. Отмечено, что при использовании анионного и неионогенного собирателей синергетический эффект будет получен, когда каждый из компонентов будет удовлетворять выполняемым им функциям в элементарном акте флотации [22, 23].

В настоящем исследовании при выборе соотношения компонентов в смеси реагентов предлагается использовать параметр взаимодействия, который характеризует синергетический эффект понижения поверхностного натяжения бинарной смеси. Следствием понижения поверхностного натяжения становится повышение поверхностного давления, что в сочетании с высокой скоростью растекания комбинации реагентов приведет к сокращению времени индукции, более быстрому формированию флотационного комплекса и повышению выхода пенного продукта. Цель настоящей работы — оценка возможности использования параметра взаимодействия при составлении комбинации катионного и анионного реагентов на основании механизма действия физической формы сорбции собирателя.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Использовались гексадецилтриметиламмоний бромид (компонент 1) и лаурилсаркозинат натрия (компонент 2) марки “Ч”, раствор гидроксида натрия 1-й % для регулирования pH. Общая концентрация (C) растворов смесей собирателей при определении поверхностного натяжения изменялась от 10^{-4} до 10^{-2} моль/л. Мольное соотношение компонентов α_1 1 и 2 в смесях варьировалось от 0.1 до 0.5.

Методом максимального давления в пузырьке воздуха с помощью тензиометра LAUDA MPT C определялось поверхностное натяжение растворов реагентов. С помощью съемки высокоскоростной камерой EverCam 1000-16-C (7000 кадров/с) методом физического моделирования устанавливалась скорость растекания растворов реагентов по поверхности воды.

В качестве образцов для флотации использовалась проба флюоритовой руды Ярославского ГОКа следующего химического состава, %: CaF_2 — 24.39, $CaCO_3$ — 9.15, SiO_2 — 29.62, Al_2O_3 — 16.03, MgO — 11.65, Fe_2O_3 — 4.53, K_2O — 3.22, Na_2O — 1.62. Руда измельчалась

в рольганговой мельнице при $T:Ж:Ш = 1:1:7$ до содержания класса -0.044 мм 88 %. Эксперименты по флотации руды выполнялись в механической флотомашине 189 ФЛ с объемом камеры 0.3 л. Масса навески составляла 50 г. В пульпу последовательно вводили собиратели или их смесь (переменное количество), пенообразователь (Т-80). Время агитации с собирателем составило 5 мин, с пенообразователем — 1 мин; время флотации — 5 мин.

Согласно теории регулярных растворов (RST), молекулярные взаимодействия между двумя ПАВ в смешанных мицеллах и смешанных адсорбционных слоях описываются параметром β . Отрицательное значение этого параметра показывает, что энергия притяжения между молекулами двух различных ПАВ сильнее, чем энергия притяжения между молекулами индивидуальных ПАВ. Этот случай соответствует проявлению синергизма в данной системе. Параметр β вычисляется из зависимости поверхностного натяжения от концентрации водных растворов индивидуальных ПАВ и их смесей [19].

В [26] приведены формулы, используемые для вычисления параметра взаимодействия, и анализируются результаты расчетов параметра β для композиции реагентов гексадецилтриметиламмоний бромида и лаурилсаркозината натрия в соотношении $\alpha_1 = 0.2, 0.5$ и 0.8 . В настоящей работе расширена область исследования, рассматриваются дополнительно комбинации указанных реагентов с другими соотношениями α_1 , уточнены экспериментальные данные по значениям поверхностного натяжения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изотермы поверхностного натяжения лаурилсаркозината натрия, гексадецилтриметиламмоний бромида и их смесей в соотношении α_1 от 0.1 до 0.5 приведены на рис. 1 и имеют типичный вид для растворов мицеллообразующих ПАВ. Установлены значения ККМ лаурилсаркозината натрия — 0.01 моль/л и гексадецилтриметиламмоний бромида — 0.0009 моль/л.

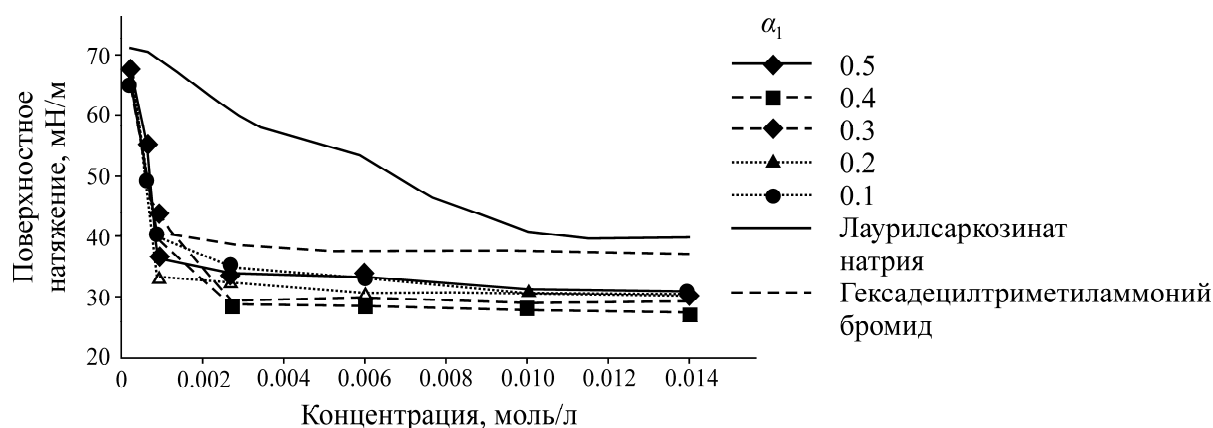


Рис. 1. Изменение поверхностного натяжения растворов комбинации реагентов от концентрации

После экспериментального определения ККМ реагентов и их смесей вычислялись доли компонентов смеси в мицелле, затем определен параметр взаимодействия ПАВ в смешанных мицеллах. Результаты вычислений приведены в табл. 1.

Смеси ПАВ при мицеллообразовании или адсорбции на границе раздела фаз “газ–жидкость” ведут себя неидеально, наблюдаются синергетические или антагонистические эффекты. Параметр взаимодействия (β_m), вычисленный по экспериментальным данным, отрицателен практически для всех рассматриваемых соотношений компонентов в смеси (кроме α_1 0.4 и 0.1), что свидетельствует о синергизме.

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

α_1	ККМ смеси, моль/л		x_1^m		$\Xi\beta_m$	${}^{\text{ид}}\beta_m$	f_1^m	f_2^m
	Идеальная	Экспериментальная	Идеальная	Экспериментальная				
0.5	0.0017	0.00070	0.92	0.67	-5.0	0.66	0.58	0.11
0.4	0.002	0.00306	0.88	0.71	0.88	-0.82	1.20	0.14
0.3	0.0025	0.00208	0.82	0.72	-1.24	-0.18	0.91	0.52
0.2	0.0033	0.00280	0.73	0.68	-0.8	-0.239	0.92	0.69
0.1	0.0050	0.01020	0.55	0.16	2.7	-0.05	6.79	1.08

Примечание: x_1^m — доля гексадецилтриметиламмоний бромида в мицелле; ${}^{\text{ид}}\beta_m$ — параметр взаимодействия при идеальном смешении; f_1^m , f_2^m — коэффициенты активности 1-го и 2-го компонентов в мицелле.

Далее от определения характеристик молекулярного взаимодействия ПАВ в смешанных мицеллах перейдем к определению состава и параметров взаимодействия смешанных адсорбционных слоев, выбрав для этого три сечения при 50, 45 и 40 мН/м. Результаты приведены в табл. 2, где σ — поверхностное натяжение растворов смеси реагентов, β_σ — параметр взаимодействия в смешанных адсорбционных слоях; x_1^σ — мольная доля компонента 1 в смешанных адсорбционных слоях.

ТАБЛИЦА 2. Расчет параметров взаимодействия и состава смешанных адсорбционных слоев гексадецилтриметиламмоний бромида и лаурилсаркозината натрия на межфазной поверхности “газ – жидкость”

σ , мН/м	α_1				
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
	$\beta_\sigma / x_1^\sigma$	$\beta_\sigma / x_1^\sigma$	$\beta_\sigma / x_1^\sigma$	$\beta_\sigma / x_1^\sigma$	$\beta_\sigma / x_1^\sigma$
50	-7.05 / 0.5	-5.98 / 0.56	-4.94 / 0.61	-4.4 / 0.65	-3.33 / 0.72
45	-7.28 / 0.5	-5.99 / 0.56	-4.06 / 0.64	-4.07 / 0.67	-3.35 / 0.73
40	-8.9 / 0.52	-7.94 / 0.56	-5.36 / 0.62	-6.66 / 0.63	-6.38 / 0.66

Полученные для смесей на всем диапазоне концентраций высокие отрицательные значения параметра взаимодействия указывают на сильное притяжение между компонентами в смешанных адсорбционных слоях. Со снижением поверхностного натяжения и, как следствие, ростом поверхностного давления значение параметра взаимодействия уменьшается.

Скорость растекания смесей реагентов на поверхности дистиллированной воды представлена на рис. 2. Рассмотренные комбинации реагентов имеют высокую скорость растекания, ее изменение коррелирует с изменением параметра взаимодействия: наибольшей скоростью обладает смесь реагентов с $\alpha_1 = 0.1$, наименьшей — смесь с $\alpha_1 = 0.5$.

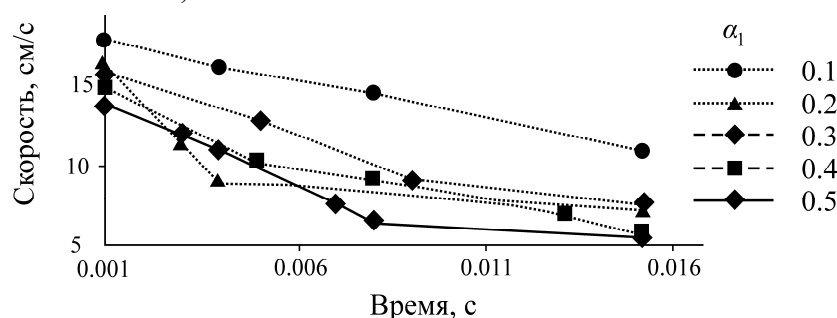


Рис. 2. Зависимость скорости растекания растворов комбинации реагентов от времени

Согласно результатам флотационных экспериментов, использование комбинации реагентов привело к повышению извлечения полезного компонента в пенный продукт, но корреляция параметра взаимодействия и извлечения полезного компонента нарушена (рис. 3).

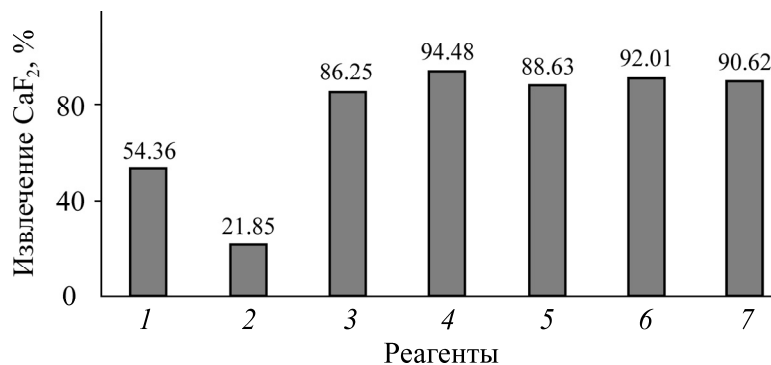


Рис. 3. Извлечение полезного компонента с использованием реагентов: 1 — лаурил-саркозинат натрия; 2 — гексадецилтриметиламмоний бромид; 3 — $\alpha_1=0.1$; 4 — $\alpha_1=0.2$; 5 — $\alpha_1=0.5$; 6 — $\alpha_1=0.3$; 7 — $\alpha_1=0.4$

Установлена связь комбинации анионного и катионного собирателей во флотации с синергетическим эффектом в понижении ими поверхностного натяжения раствора и скорости растекания смеси по поверхности воды. Параметр взаимодействия можно предложить в качестве дополнительного критерия для оценки собирательной способности комбинации реагентов в рамках механизма работы физической формы сорбции. Однако прямая корреляция параметра взаимодействия и извлечения при различном значении соотношений компонентов смеси реагентов может нарушаться, что подтверждается данными в [17].

ВЫВОДЫ

Определено отношение концентраций компонентов в смеси, при которых достигаются максимальные значения отрицательного параметра взаимодействия и собирательной активности композиций анионного и катионного реагентов.

Установлена корреляция параметра взаимодействия со скоростью растекания смеси собирателей по поверхности воды, т. е. обнаружена потенциальная возможность сокращения времени индукции.

Показано оптимальное соотношение компонентов в смеси, при котором формируется наиболее активное на границе раздела “газ – жидкость” сочетание реагентов, не соответствующее максимальному извлечению целевого минерала. Большее содержание в смеси гексадецилтриметиламмоний бромида ($\alpha_1 = 0.2 - 0.3$), необходимое для повышения извлечения, указывает на его менее активную сорбцию минеральной поверхностью в сравнении с реагентом-партнером.

При составлении комбинации реагентов, выборе их соотношений целесообразно учитывать неравенство сорбционной активности компонентов минеральной поверхностью и скорректировать содержание физически закрепившихся форм с целью получения синергетического эффекта на границе раздела “газ – жидкость”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абрамов А. А.** Собрание сочинений: Т. 7: Флотация. Реагенты-собиратели. — М.: Горная книга, 2012. — 656 с.
2. **Filippova I. V., Filippov L. O., Duverger A., and Severov V. V.** Synergetic effect of a mixture of anionic and nonionic reagents: Ca mineral contrast separation by flotation at neutral pH, *Miner. Eng.*, 2014. — P. 1–10.
3. **Nogueira S.** Collector mixtures and their synergistic effect on quartz floatability, *REM, Int. Eng.*, Ouro Preto, 2022, Vol. 75(4). — P. 371–378.
4. **Bradshaw D. J., Harris P. J., and O'Connor C. T.** Synergistic interactions between reagents in sulphide flotation, *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.*, 1998, Vol. 98, No. 4. — 189–194.
5. **Bu Y., Liu R., Sun W., and Hu Y.** Synergistic mechanism between SDBS and oleic acid in anionic flotation of rhodochrosite, *Int. J. Miner. Mater.*, 2015, Vol. 22, No. 5. — P. 447–452.
6. **Глембоцкий В. А., Классен В. И.** Флотация. — М.: Недра, 1973. — 384 с.
7. **Hao J., Ya G., Khoso S. A., Wanying J., and Yuehua H.** A new approach for characterization of hydrophobization mechanisms of surfactants on muscovite surface, *Separation and purification technology*, 2019, Vol. 209. — P. 936–945.
8. **Xu L., Tian J., Wu H., Lu Z., Sun Wu., and Hu Y.** The flotation and adsorption of mixed collectors on oxide and silicate minerals, *Adv. Colloid Interface Sci.*, 2017, Vol. 250. — P. 1–14.
9. **Dhar P., Thornhill M., and Kota H. R.** An overview of calcite recovery by flotation, *Mater. Circular Economy*, 2020, Vol. 2, No. 9. — 20 p.
10. **Valdiviezo E. and Oliveira J. F.** Synergism in aqueous solutions of surfactant mixtures and its effect on the hydrophobicity of mineral surfaces, *Miner. Eng.*, 1993, Vol. 6, No. 6. — P. 655–661.
11. **Jost F., Leiter H., and Schwuger M. J.** Synergisms in binary surfactant mixtures, *Colloid Polym Sci.*, 1988, Vol. 266. — P. 554–561.
12. **Liang S., Jinbo Z., Lingyun L., and Huaifa W.** Flotation of fine kaolinite using dodecylamine chloride/fatty acids mixture as collector, *Powder Technol.*, 2017, Vol. 312. — P. 159–165.
13. **Alexandrova L., Hanumantha Rao K., Forsberg K. S. E., Grigorov L., and Pugh R. J.** The influence of mixed cationic-anionic surfactants on the three-phase contact parameters in silica-solution systems, *Colloids Surf. A: Physicochemical and engineering aspects*, 2011, Vol. 373. — P. 145–151.
14. **Bagheri A. and Jafari-Chashmi P.** Study of aggregation behavior between N-lauryl sarcosine sodium and Dodecyltrimethylammonium bromide in aqueous solution, using conductometric and spectropometric techniques, *J. Mol. Liq.*, 2019, Vol. 282. — P. 466–473.
15. **Pienaar D., McFadzean B., and 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 Int. Miner. Process. Congr.*, Cape Town, South Africa. 2020. — P. 2033–2043.
16. **Rosen Milton J. and Kunjappu Joy T.** Surfactants and interfacial phenomena, 4th ed., 2012. — 600 p.
17. **Tian J., Xu L., Deng W., Jiang H., Gao Z., and Hu Y.** Adsorption mechanism of new anionic/cationic collectors in a spodumene–feldspar system, *Chem. Eng. Sci.*, 2017, Vol. 164. — P. 99–107.
18. **Базарова Е. А., Митрофанов Г. В.** Синергизм сульфгидрильных и комплексообразующих собирателей в процессе флотации медно-никелевых руд // Материалы междунар. конф. “Современные проблемы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья” — М.: Спутник+, 2023. — С. 275–278.

- 19. Иванова Н. И.** Мицеллообразование и поверхностные свойства водных растворов бинарных смесей Твин-80 и бромида цетилтриметиламмония // Вестн. МГУ. Серия 2. Химия. — 2012. — № 1. — Т. 53. — С. 44–49.
- 20. Кондратьев С. А.** Критерий выбора собирателей с целью получения синергетического эффекта // Материалы междунар. конф. “Современные проблемы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья”. — М.: Спутник+, 2023. — 567 с.
- 21. Kondratyev S. A. and Semyanova D. V.** A revisit of selection the efficiency criterion for flotation reagents of fatty acids class, Eurasian Min., 2017, No 1. — P. 24–29.
- 22. Коновалов И. А., Кондратьев С. А.** Флотационная активность солей ксантогеновой кислоты // ФТПРПИ. — 2020 — № 1. — С. 114–124.
- 23. Кондратьев С. А., Цицилина Д. М.** Избирательность флотационного извлечения кальцийсодержащего минерала осадками оксигидрильного собирателя // ФТПРПИ. — 2023. — № 2. — С. 112–122.
- 24. Sis H. and Chander S.** Adsorption and contact angle of single and binary mixtures of surfactants on apatite, Min. Eng., 2003, Vol. 16. — P. 839–848.
- 25. Шепета Е. Д., Игнаткина В. А., Кондратьев С. А., Саматова Л. А.** Флотация кальциевых минералов сочетанием реагентов разной молекулярной структуры // ФТПРПИ. — 2019. — № 6. — С. 124–139.
- 26. Семьянова Д. В.** Синергетический эффект комбинации собирателей при адсорбции на границе “газ–жидкость” // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2021. — Т. 2. — № 4. — С. 116–122.

Поступила в редакцию 04/X 2024

После доработки 01/XI 2024

Принята к публикации 08/XI 2024