

ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.765.4

ИЗБИРАТЕЛЬНОСТЬ ФЛОТАЦИОННОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ КАЛЬЦИЙСОДЕРЖАЩЕГО МИНЕРАЛА ОСАДКАМИ ОКСИГИДРИЛЬНОГО СОБИРАТЕЛЯ

С. А. Кондратьев, Д. М. Цицилина

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

Представлен краткий обзор публикаций по флотации кальцийсодержащих минералов. Установлена связь флотационной активности собирателя с работой, выполняемой физически сорбируемым собирателем при закреплении минеральной частицы на пузырьке газа. Экспериментально показано, что снижение работы физической формы сорбции приводит к уменьшению извлечения и увеличению отношения содержания полезного компонента в концентрате к его извлечению. Установленная зависимость — основа для разработки новых методов повышения качества флотационных концентратов. Предложен метод выбора композиции собирателей, позволяющий повысить селективность извлечения полезных минералов.

Флотация, селективность, апатитовая руда, работа физически сорбируемого собирателя, синергизм собирателей

DOI: 10.15372/FTPRPI20230211

Накоплен значительный объем экспериментальных сведений по флотации ограниченно растворимых минералов. Задача повышения селективности разделения кальцийсодержащих минералов решается на основе термодинамических представлений об элементарном акте флотации. Предполагается, что избирательное извлечение достигается при значительном различии в гидрофобности разделяемых минералов, характеризуемой краевым углом [1]. Корреляция результатов адсорбции олеата с поведением апатита при флотации позволила предположить, что поверхностное осаждение олеата кальция — преобладающий механизм повышения наблюдаемой гидрофобности частиц апатита [2]. Подобный подход исключает изучение кинетики взаимодействия минеральной частицы с пузырьком из рассмотрения методов повышения показателей флотации.

Установлено, что флотируемость трех кальцийсодержащих минералов — апатита, флюорита и кальцита олеатом натрия коррелирует с минимальным поверхностным натяжением на границе раздела “газ – жидкость” [3]. Минимальное поверхностное натяжение (34 – 37 мН/м) рас-

творя отмечается для апатита и флюорита в нейтральной области рН и связано с формированием в растворе предмицеллярных ассоциатов. Для кальцита минимальное значение наблюдается при более высоких значениях рН и концентрации ионов кальция. Предполагается, что флотиримость минералов обусловлена образованием димеров олеатов металлов, ионно-молекулярных ассоциатов, изменяющих свойства пленок на границах раздела сред.

Высокое излечение объясняется дополнительной гидрофобизацией минеральной поверхности указанными ассоциатами и усилением адгезии частицы к пузырьку. С ростом содержания ионов Ca^{2+} в пульпе флотиримость кальцитов различного генезиса увеличивается [4]. В [5] установлена связь поверхностного натяжения пульпы с флотиремостью гематита. Совпадение рН флотационной системы, при которой достигаются максимальные концентрации ионно-молекулярных ассоциатов и флотиремости гематита, отмечается в [6].

В [7] исследовано влияние ионной силы (содержание Ca^{2+}) на адсорбцию олеата калия на поверхности апатита *in situ* с помощью атомно-силовой микроскопии. Адсорбция олеата в присутствии высокой ионной силы происходит за счет образования кластеров диолеата кальция, наблюдаемых на 2D- и 3D-микротопографии. Наличие этих скоплений делает поверхность апатита неоднородной и шероховатой, что негативно влияет на его флотиремость.

Возможность селективного разделения апатита и кальцита флотацией исследуется в [8]. Сорбция олеата происходит при отрицательно заряженной поверхности минералов, что доказывает хемосорбционный механизм закрепления олеата. Характер зависимости флотиремости апатита от концентрации олеата натрия (не менее 10^{-4} М) указывает на формирование гемимицелл на поверхности минерала. Контроль рН и концентрации олеата натрия позволяют разделить апатит и кальцит методом флотации. Селективность разделения минералов может быть повышена в области рН 10 применением метасиликата натрия — депрессора кальцита. По экспериментальным данным [9], флотация апатита из смеси с доломитом начинается при концентрации олеата натрия не менее 10^{-4} М.

В области низких концентраций олеата преобладает хемосорбция. При приближении к монослойному ($\sim 1.2 \cdot 10^{-5}$ моль/л) покрытию формируются хорошо организованные плотноупакованные структуры с сильным латеральным взаимодействием. Эти структуры ответственны за гидрофобные свойства образца при покрытии ~ 0.7 плотноупакованного монослоя [10]. Использование более высоких концентраций ($> 1.2 \cdot 10^{-5}$ моль/л) приводит к адсорбции олеата по механизму трехмерной конденсации. Адсорбированные молекулы образуют плохо организованную структуру, которая не обеспечивает высокой гидрофобности апатита. Как показано в [8, 9], флотация выполняется при концентрации олеата не менее 10^{-4} моль/л. При этой концентрации формируется трехмерная структура с пониженной гидрофобностью [7, 10]. Из этого следует необходимость наличия на минеральной поверхности физически сорбированных форм собирателя для реализации флотационного процесса.

В [11] изучены поверхностные свойства осадков, представленных продуктами взаимодействия олеата и нитрата кальция. Установлено, что поверхностное натяжение раствора составляет 34 мН/м при концентрации олеата калия $3 \cdot 10^{-3}$ и нитрата кальция $1 \cdot 10^{-4}$ М. Значит, осадки собирателя (металлсурфактанты) могут растекаться по поверхности воды и выполнять функцию физически сорбируемого собирателя.

Осадки карбоновых кислот обладают меньшими собирательными свойствами в сравнении с соответствующими кислотами и их ионно-молекулярными ассоциатами. Поверхностное натяжение растворов карбоновых кислот увеличивается при повышении концентрации ионов кальция $[\text{Ca}^{2+}]$ более $1.2 \cdot 10^{-5}$ М и особенно резко при превышении стехиометрического соотношения [12]. По этой причине осадки кислот имеют более слабые собирательные свойства

в сравнении с ионно-молекулярными ассоциатами кислот, так как поверхностное давление — фактор, определяющий скорость растекания пленки собирателя по поверхности воды, уменьшается. Наиболее заметное уменьшение собирательной силы наблюдается для стеариновой кислоты, наименее заметное снижение собирательной силы в присутствии ионов кальция у линоленовой кислоты. Поэтому при флотации кальцийсодержащих минералов необходимо применение неионогенных собирателей, не вступающих в химическую связь с катионами раствора и обладающих высокой скоростью растекания по границе раздела “газ–жидкость”.

Синергетические эффекты от применения композиций собирателей во флотации ограниченно растворимых минералов рассмотрены в [13]. Показано, что в результате реакции основного ионогенного собирателя с ионами Ca^{2+} и Mg^{2+} снижается содержание олеата, доступного для процесса гидрофобизации. Образуются осадки, которые не селективно выделяются из раствора на содержащиеся в пульпе минералы, в том числе на разделяемые. Применение неионогенного собирателя рассматривается как защита ионогенного собирателя от образования нерастворимых солей. По предположению авторов, формирование во флотационной камере смешанных мицелл олеата и неионогенного собирателя предотвращает образование нерастворимых солей олеатов. Предположение довольно спорное, так как функциональные группы ионогенного собирателя в мицелле будут направлены в сторону полярной жидкости.

Флотация фосфатов композицией собирателей изучалась в [14]. Использовались полиэтиленгликолевые эфиры с разным числом оксиэтильных групп в сочетании с олеатом натрия и додеканом. Наиболее высокое извлечение получено в присутствии нонилфенола ПЭНФ-4 с незначительным снижением качества концентрата. Отмечается более низкое поверхностное натяжение раствора композиции собирателей в сравнении с поверхностным натяжением раствора олеата натрия. Применение смеси анионного и неионогенного собирателей и сокращение их общего расхода повысило извлечение шеелита и качества концентрата [15]. В традиционном процессе флотации фосфатов (Crago) применяются катионные и анионные собиратели. В цикле анионной флотации используются жирные кислоты и дизельное топливо [16]. Доказано, что в некоторых случаях, особенно в отношении флотации крупных классов, использование смесей собирателей может быть очень полезным [17].

Изучена возможность повышения селективности извлечения шеелита применением комплексообразующих реагентов [18]. Указывается, что в присутствии кальцита ни один из общеизвестных реагентов не может обеспечить требуемую селективность извлечения минерала. Предполагается, что реагент, образующий комплексное соединение с WO_4^{2-} ионом, будет селективно извлекать минерал. В качестве собирателя-лиганда предложен 4-трет-бутилкатехин (4 ТБС). Указанный реагент при концентрации 10^{-3} М и pH 9.5 флотирует и кальцит, более того сорбция на кальците превосходит сорбцию на шеелите. Комплексообразующие реагенты, которые широко применяются во флотации сульфидных руд, не оказались селективными при флотации умеренно растворимых минералов.

Анализ цитируемых работ указывает на:

— совпадение pH минимального поверхностного натяжения (соответственно, высокого поверхностного давления) раствора собирателя с pH максимального извлечения апатита в концентрат;

— реализацию флотации в том случае, когда на минеральной поверхности содержатся физически сорбируемые формы собирателя (димеры олеатов металлов, ионно-молекулярные ассоциаты), понижающие гидрофобность минеральной поверхности в сравнении с гидрофобностью поверхности с плотноупакованным монослоем хемосорбированного собирателя;

— несоответствие экспериментальных фактов предположению авторов цитируемых работ о повышении извлечения полезного минерала в результате его дополнительной гидрофобизации физически закрепившимся собирателем (увеличение адсорбции) и усилением связи минеральной частицы с пузырьком газа;

— неселективность свойств комплексообразующих собирателей, которые широко применяются во флотации сульфидных руд, но оказались не столь избирательными при флотации умеренно растворимых минералов.

Кинетика взаимодействия минеральной частицы с пузырьком, возможность избирательно сокращения времени индукции для целевых минералов не изучались.

Цель настоящей публикации — повышение показателей флотации апатита из смеси умеренно растворимых минералов на основе механизма работы физически сорбируемого собирателя. Выбор свойств собирателя или собирателей, входящих в композицию, на основе соответствия выполняемых ими функций в элементарном акте флотации: гидрофобизации и повышения скорости удаления жидкости с поверхности извлекаемого минерала.

МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

В качестве собирателя использовались карбоновые кислоты: гексановая (ТУ 6-09-126-75), октановая (ТУ 6-09-529-75), декановая (ТУ 6-09-320-75), додекановая (ТУ 6-09-612-76), тетрадекановая (ТУ 6-09-127-75), гексадекановая (ТУ 6-09-4132-75), олеиновая (ГОСТ 7580-91). Физически сорбируемым, гетерополярным собирателем служил Флотек, применяемый во флотации угля, а пенообразователем — Т-80; CaCl_2 (ГОСТ 450-77) использовался для получения олеата кальция. Выполнялась флотация апатитовой руды (г. Кировск). Ниже приведен ее химический состав, %:

SiO_2	CaO	Al_2O_3	P_2O_5	Na_2O	Fe_2O_3	K_2O	TiO_2	MgO	SrO	MnO
26.97	17.18	16.41	13.58	11.54	4.80	4.52	1.58	1.54	0.92	0.13

Флотация апатитовой руды проводилась в лабораторной флотационной машине ФМП-Л1 с камерой объемом 0.5 л. Поверхностные натяжения растворов карбоновых кислот определялись с помощью тензиометра LAUDA MPT C.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Флотация карбоновыми кислотами. Опыты по флотации апатитовой руды с содержанием P_2O_5 13.58 % выполнялись карбоновыми кислотами C_6 – C_{16} . Масса навески руды составила 200 г, расход собирателя — 300 г/т, расход пенообразователя Т-80 — 50 г/т, рН пульпы 8–9. Выбор диапазона рН обусловлен наиболее высоким поверхностным давлением пленки олеата на поверхности воды, характерным для этой области рН [19]. Результаты флотационного извлечения апатитовой руды гомологическим рядом карбоновых кислот приведены на рис. 1.

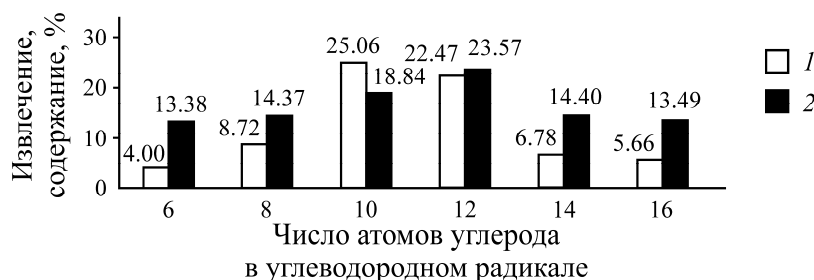


Рис. 1. Извлечение (1) и содержание (2) P_2O_5 в концентрате в зависимости от числа атомов углерода в углеводородном радикале насыщенной карбоновой кислоты

Длинноцепочечные насыщенные кислоты вследствие когезии молекул находятся в конденсированном состоянии. Поверхностное давление и растекание по поверхности воды отсутствуют. С уменьшением длины цепи карбоновых кислот давление в пленке растет и при C_{12} тепловое движение молекул начинает преобладать над их взаимным притяжением (кинетическая энергия молекул превышает энергию когезии). Уменьшение длины углеводородного радикала (< 8 атомов углерода в радикале) приведет к выходу части молекул из пленки в граничащую с ней среду. Определение скорости растекания нанесением микрокапли на поверхность воды не будет отражать действительную скорость растекания молекул короткоцепочечных кислот по поверхности пузырька в условиях флотации. Вследствие высокой растворимости часть молекул будет переходить из пленки в раствор, понижая поверхностное давление короткоцепочечной кислоты. Поверхностное давление этих кислот, которое может реализоваться во флотационном процессе при прорыве прослойки жидкости, оценивалось как разность двух поверхностных натяжений растворов собирателя: поверхностного натяжения, возникающего при флотационной концентрации собирателя, и натяжения, обусловленного локальной повышенной концентрацией собирателя в результате его сорбции на минерале, т. е. аналогично правилу Антона. Локальные значения концентрации реагента у минеральной поверхности могут превышать объемную концентрацию на два порядка [20]. Сорбция на границе раздела “твердое – жидкость” также зависит от длины углеводородного фрагмента [21].

Флотация осадками олеиновой кислоты. Опыты по флотации апатитовой руды выполнялись осадками олеата кальция. Извлечение оксида фосфора (V) и его содержание в концентрате определялись в зависимости от мольного соотношения кальция и олеиновой кислоты. Расход олеиновой кислоты 100 г/т, исходная концентрация $1.416 \cdot 10^{-4}$ моль/л (0.02 г/л), pH 8.5. На рис. 2 показаны результаты флотации апатитовой руды осадками олеата кальция, а также скорость растекания осадков на поверхности воды. Мольное соотношение ионов кальция и олеиновой кислоты менялось в пределах 1 : 2 – 1 : 20.

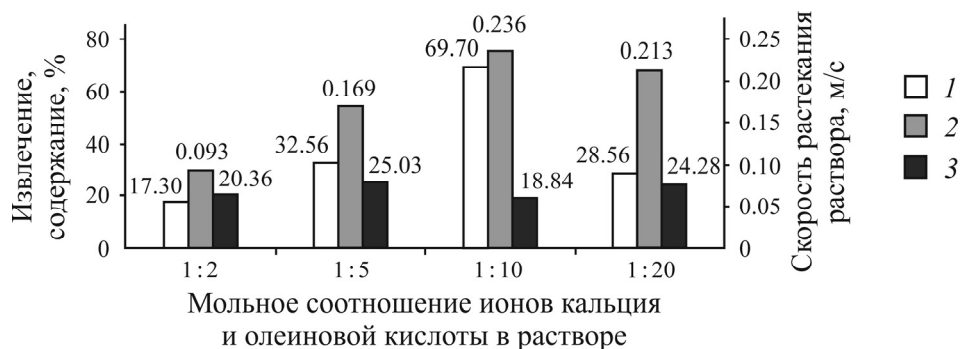


Рис. 2. Извлечение (1), содержание P_2O_5 в концентрате (3) и скорость растекания раствора по поверхности воды (2) в зависимости от мольного соотношения кальция к олеиновой кислоте

Флотация сочетанием собирателей. Максимальное различие во флотируемости апатита и доломита достигается в щелочной области при pH 8.5 [9]. Следовательно, использование ионогенного собирателя с малым расходом и гетерополярного сильного собирателя может дать положительный синергетический эффект при данном pH. Расход олеиновой кислоты принимался из расчета создания условного монослоя на поверхности апатита ($\sim 10^{-5}$ моль/л). Согласно [10], гидрофобность минерала при таком расходе максимальна. Отсутствие физической формы сорбции (осадков олеата кальция) предполагает подавление флотируемости минерала.

Дополнительная подача физически сорбируемого гетерополярного неионогенного собирателя в виде эмульсии, по мнению [14–16], увеличит извлечение при его низком расходе.

Опыты по флотации апатитовой руды выполнялись композицией собирателей: ионогенным олеатом натрия и неионогенным собирателем Флотек. Извлечение оксида фосфора (V) и его содержание в концентрате определялись в зависимости от соотношения ионогенного и неионогенного собирателей. На рис. 3 приведены результаты флотации апатитовой руды сочетанием собирателей.

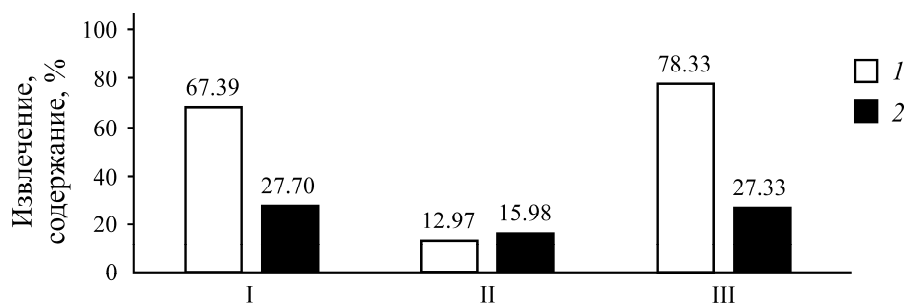


Рис. 3. Извлечение (1) и содержание (2) P_2O_5 в концентрате в зависимости от соотношения расходов олеата и собирателя Флотек: I — олеат натрия 240 г/т; II — Флотек 240 г/т; III — олеат натрия 200 г/т, Флотек 50 г/т

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки флотационной активности собирателя использовался критерий — работа физической формы сорбции при растекании ее по границе раздела “газ–жидкость” (по поверхности пузырька) в элементарном акте флотации [22]. Сила физически сорбированного реагента-собирателя — мера воздействия пленки его производных форм на жидкость в прослойке, заключенной между минералом и пузырьком газа, в момент ее прорыва [23]. Работа, выполняемая физически сорбируемым собирателем, определялась по формуле $W = \pi S$ (π — поверхностное давление; S — площадь жидкости, покрытая собирателем за время растекания).

Работа по удалению жидкости с поверхности флотационных частиц размером 100×100 мкм составила $\pi S \cdot 10^{-8}$ Дж. Для гексановой, октановой, декановой, додекановой, тетрадекановой и гексадекановой поверхностные давления равны 1.5, 7.2, 10.2, 15.1, 9.0 и 6.1 мН/м соответственно. Работа, выполняемая этими кислотами при растекании по поверхности воды, Дж: $1.5 \cdot 10^{-11}$, $7.2 \cdot 10^{-11}$, $15.1 \cdot 10^{-11}$, $10.2 \cdot 10^{-11}$, $9.0 \cdot 10^{-11}$ и $6.1 \cdot 10^{-11}$. Таким образом, максимальную работу по осушению минеральной частицы под пузырьком выполняет додекановая карбоновая кислота. Для сравнения: поверхностное давление олеиновой кислоты 30.0 мН/м, работа по покрытию указанной площади $3 \cdot 10^{-10}$ Дж.

Для карбоновых кислот, отличающихся длиной углеводородного радикала, выполнено сопоставление соотношений содержания полезного компонента к его извлечению в концентрат в соответствии с рис. 1. Для гексановой кислоты данное соотношение составило 3.345, для октановой — 1.640, для декановой — 0.720, для додекановой — 1.048, для тетрадекановой — 2.124, для гексадекановой — 2.380. Между работой, выполняемой физически сорбируемым собирателем, и извлечением полезного компонента в концентрат существует корреляционная связь. Уменьшение этой работы повышает отношение содержание : извлечение. Таким образом, физическая форма сорбции собирателя в большей мере определяет извлечение, химическая — качество концентрата.

Для повышения содержания полезного компонента необходимо применить более слабый собиратель или сократить его расход. Более слабыми собирателями оказались коротко- и длинно-цепочечные собиратели. Декановая кислота, обладающая максимальным собирательным эффектом среди насыщенных кислот, имеет самое низкое соотношение содержание : извлечение. Механизм работы физически сорбируемого собирателя позволяет объяснить смысл известного правила повышения качества концентрата уменьшением расхода или применением более слабого собирателя. Высокое поверхностное давление и, соответственно, высокая скорость растекания физической формы сорбции собирателя по границе раздела “газ – жидкость” приводят к ускорению удаления жидкости из прослойки, разделяющей минеральную частицу и пузырек. В результате сокращается время индукции и увеличивается извлечение полезного компонента (рис. 4). Одновременно сокращается время индукции частиц вмещающих пород, на которых закрепилась указанная форма сорбции, и снижается содержание полезного компонента в концентрате.

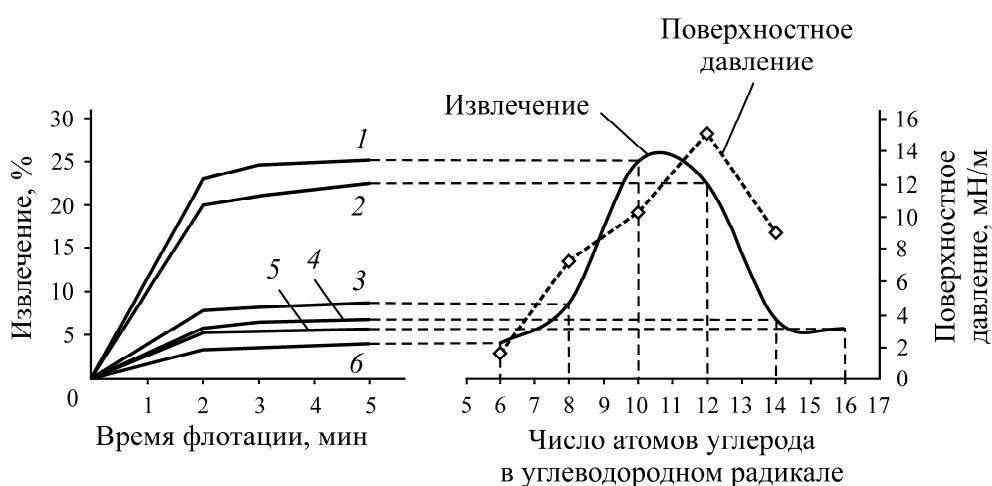


Рис. 4. Кинетика извлечения апатита в зависимости от числа атомов углерода в углеводородном фрагменте кислоты и поверхностного давления кислот: 1 — декановая; 2 — додекановая; 3 — октановая; 4 — тетрадекановая; 5 — гексадекановая; 6 — гексановая

Кинетика флотации является интегральной характеристикой времени индукции для всего коллектива минеральных частиц, содержащихся в пульпе. Для собирателей, представленных продуктами взаимодействия кальция с олеатом, установлена аналогичная корреляция скорости растекания осадков со скоростью извлечения апатита (рис. 5). Выполнено сопоставление соотношений содержания P_2O_5 к извлечению в концентрат в соответствии с рис. 2. При мольном соотношении кальция к олеиновой кислоте 1 : 2 соотношение содержание : извлечение составило 1.178; при мольном соотношении реактивов 1 : 5 соотношение содержание / извлечение равно 0.768; при мольном соотношении 1 : 10 — 0.270 и при соотношении 1 : 20 — 0.850. Таким образом, при флотации осадками выявлена аналогичная зависимость содержания полезного компонента в концентрате от извлечения, аналогичная зависимости при использовании гомологического ряда насыщенных карбоновых кислот. Изменение извлечения в первом случае достигалось применением кислот с различной длиной углеводородного фрагмента, во втором — выбором мольного соотношения кальция к олеиновой кислоте.

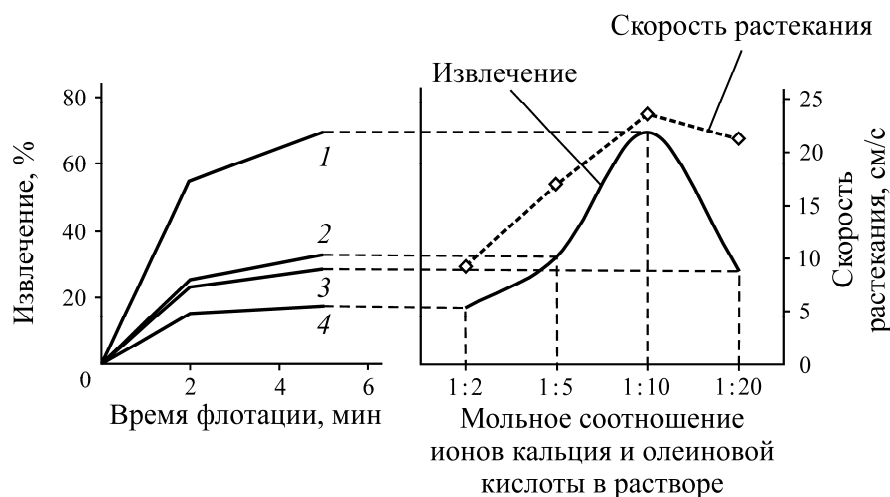


Рис. 5. Кинетика извлечения апатита в зависимости от мольного отношения кальция к олеиновой кислоте и скорости растекания осадков кислот по поверхности воды. Мольное отношение кальция к олеиновой кислоте: 1 — 1 : 10; 2 — 1 : 5; 3 — 1 : 20; 4 — 1 : 2

Применение сочетания собирателей ионогенного и гетерополярного неионогенного позволяет увеличить извлечение полезного компонента в концентрат в соответствии с механизмом работы физически сорбируемого собирателя. Использование одного олеата натрия дало возможность получить извлечение 71.75 %, добавление Флотека, имеющего скорость растекания по поверхности воды 30 см/с, извлечение увеличилось до 83.87 %. В связи с неизбирательностью работы физически сорбируемого собирателя содержание полезного компонента в концентрате снизилось с 28.79 до 27.39 %.

Результаты флотации апатитовой руды сочетанием собирателей олеата натрия и Флотека показали, что добавление физически сорбируемого собирателя увеличивает извлечение (рис. 3). Скорость растекания собирателя Флотека составляет 30 см/с. Высокая скорость растекания предопределяет повышенную скорость флотации и извлечение. Вследствие неселективной работы физически закрепившегося собирателя содержание апатита в концентрате несколько снижается.

Полученные результаты отражают зависимость извлечения от скорости растекания собирателя по границе раздела “газ – жидкость” и обратную зависимость для качества концентрата. Указанные зависимости характерны для всех физически закрепившихся поверхностно-активных собирателей, но численные значения содержания и извлечения являются индивидуальными для каждого собирателя. Они обусловлены соотношением химической и физической форм сорбций, степенью гидрофобизации минеральной поверхности, определяющей критическую толщину прорыва прослойки жидкости, разделяющей объекты взаимодействия.

Синергетический эффект может быть получен, когда свойства каждого из собирателей, входящих в композицию, будут удовлетворять выполняемым ими функциям в элементарном акте флотации. Его следует ожидать от применения ионогенного собирателя-гидрофобизатора с малым расходом и сильного гетерополярного собирателя. Под сильным гетерополярным собирателем подразумевается собиратель, обладающий высокой скоростью растекания по границе раздела “газ – жидкость”. Гидрофобизация преимущественно частиц целевого минерала и закрепление на гидрофобизированных участках сильного гетерополярного собирателя приведет к высокому качеству концентрата при сохранении или повышении извлечения. По данной схеме работает цикл анионной флотации в процессе Crago [15].

Близкие результаты могут быть получены в случае применения слабого ионогенного собирателя и сильного неионогенного. Слабый собиратель при соответствующем расходе закрепится преимущественно на целевых минералах и повысит их гидрофобность. Слабый ионогенный собиратель, например гексановая кислота, и гетерополярный сильный (с высокой скоростью растекания) собиратель повысят извлечение и качество концентрата при уменьшении суммарного расхода.

Изучена собирательная активность и качество получаемого флотационного концентрата при использовании четырех гидроксамовых кислот: стеариновой, олеиновой, линолевой и линоленовой [24]. На примере флотации родохрозита показано, что собирательная активность кислот увеличивается в следующей последовательности: стеариновая > олеиновая > линоленовая > линолевая. Отношение содержания родохрозита в концентрате к его извлечению для кислот: стеариновой 0.228, олеиновой 0.200, линолевой 0.192 и линоленовой 0.175. Последовательность увеличения поверхностного давления: стеариновая > олеиновая > линолевая $\approx$ линоленовая. Приведенный пример подтверждает, что увеличение поверхностного давления, являющегося движущей силой растекания пленки собирателя по воде, приводит к увеличению содержания полезного компонента в концентрате. Отклонение для линоленовой кислоты обусловлено достаточно низким значением pK_a этой кислоты (8.2). Предложенный механизм работы физически сорбируемого собирателя является универсальным и открывает путь выбора флотационного собирателя, сочетания собирателей или синтеза новых и перспективных для различных минералов.

ВЫВОДЫ

Установлена связь флотационной активности собирателя с работой, выполняемой физически сорбируемым собирателем при закреплении частицы апатита на пузырьке газа. Увеличение работы, выполняемой физически сорбируемым собирателем, приводит к росту извлечения полезного компонента. Одновременно сокращается отношение содержания полезного компонента в концентрате к его извлечению. Таким образом, физическая форма сорбции является не селективно работающей формой, определяющей извлечение.

Экспериментально показано, что уменьшение работы физической формы сорбции приводит к увеличению отношения содержания полезного компонента в концентрате к его извлечению. Избирательность извлечения полезного компонента в большей степени обусловлена свойствами хемосорбируемого собирателя.

Доказана зависимость кинетики флотации апатита от поверхностного давления пленки физически сорбируемого собирателя и скорости ее растекания по поверхности воды. Собирательная активность физически сорбированных реагентов не зависит от их природы, а определяется указанными свойствами. Скорость флотации или время индукции зависит от свойств физически сорбируемого собирателя.

На основании механизма работы физически сорбируемого собирателя предложен метод выбора сочетания реагентов, каждый из которых выполняет свою функцию в образовании флотационного комплекса. Ионогенный собиратель необходим для гидрофобизации извлекаемого минерала, дополнительный гетерополярный — для сокращения времени формирования флотационного комплекса и повышения извлечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Santos E. P., Dutra A. J. B., and Oliveira J. F.** The effect of jojoba oil on the surface properties of calcite and apatite aiming at their selective flotation, *Int. J. Miner. Process.*, 2015, Vol. 143. — P. 34–38.
2. **Moudgil B. M. and Cbanchani R.** Flotation of apatite and dolomite using sodium oleate as the collector, *Miner. Metallurg. Process.*, 1985. — P. 13–19.
3. **Pugh R. and Stenius P.** Solution chemistry studies and flotation behaviour of apatite, calcite and fluorite minerals with sodium oleate collector, *Int. J. Miner. Process.*, 1985, Vol. 15. — P. 193–218.
4. **Horta D. G., Monte M. B. M., and Leal-Filho L. S.** Effect of dissolution kinetics on flotation response of calcite with oleate, *Brazilian J. Chemic. Eng.*, 2017, Vol. 34, No. 4. — P. 1035–1042.
5. **Kulkarni R. D. and Somasundaran P.** Kinetics of oleate adsorption at the liquid/air interface and its role in hematite flotation, *Symp. series, AIChE*, 1975, Vol. 71, No. 150. — P. 124–133.
6. **Kulkarni R. D. and Somasundaran P.** Flotation chemistry of hematite/oleate system, *Colloids Surf.*, 1980, Vol. 1. — P. 387–405.
7. **Paiva P. R. P., Monte M. B. M., Simao R. A., and Gaspar J. C.** In situ AFM study of potassium oleate adsorption and calcium precipitate formation on an apatite surface, *Miner. Eng.*, 2011, Vol. 24. — P. 387–395.
8. **Mishra S. K.** Electrokinetic properties and flotation behaviour of apatite and calcite in the presence of sodium oleate and sodium metasilicate, *Int. J. Miner. Process.*, 1982, Vol. 9. — P. 59–73.
9. **Moudgil B. M. Cbanchani.** Flotation of apatite and dolomite using sodium oleate as the collector, *Miner. Metall. Process.*, 1985. — P. 13–19.
10. **Mielczarski J. A., Cases J. M., Bouquet E., Barres O., and Delon J. F.** Nature and structure of adsorption layer on apatite contacted with oleate solution. 1. Adsorption and Fourier transform infrared reflection studies, *Langmuir*, 1993, Vol. 9. — P. 2370–2382.
11. **Matijevic E., Leja J., and Nemeth R.** Precipitation Phenomena of heavy metal soaps in aqueous solutions I. Calcium oleate, *J. Colloid Interface Sci.*, 1966, Vol. 22. — P. 419–429.
12. **Beneventi D., Carré B., and Gandini A.** Precipitation and solubility of calcium soaps in basic aqueous media, *J. Colloid Interface Sci.*, 2001, Vol. 237, No. 1. — P. 142–144.
13. **Sis H. and Chander S.** Reagents used in the flotation of phosphate ores: a critical review, *Miner. Eng.*, 2003, Vol. 16. — P. 577–585.
14. **Sis H. and Chander S.** Improving froth characteristics and flotation recovery of phosphate ores with nonionic surfactants, *J. Miner. Eng.*, 2003, Vol. 16. — P. 587–595.
15. **Von Rybinski W. and Schwuger M. J.** Adsorption of surfactant mixtures in froth flotation, *Langmuir*, 1986, Vol. 2. — P. 639–643.
16. **Abdel-Zaher M. Abouzeid.** Physical and thermal treatment of phosphate ores — an overview, *Int. J. Miner. Process.*, 2008, Vol. 85. — P. 59–84.
17. **Pinto C. A. F., Yarar B., and Araujo A. C.** Apatite flotation kinetics with conventional and new collectors, Preprint No. 91-80, SME (Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, INC) Annual Meeting, Denver, Colorado, 1991. — P. 1–8.
18. **Atademir M. R., Kitchener J. A., and Shergold H. L.** The surface chemistry and flotation of scheelite, II. Flotation “collectors”, *Int. J. Miner. Process.*, 1981, Vol. 8. — P. 9–16.
19. **Hernainz F. B. C. and Calvez B.** Modification of surface tension in aqueous solutions of sodium oleate according to temperature and pH in the flotation bath, *J. Colloid Interface Sci.*, 1995, Vol. 173. — P. 8–15.
20. **Novich B. E.** Flotation response prediction from interfacial properties, *Colloids Surf.*, 1990, Vol. 46. — P. 255–269.

21. **Somasundaran P., Healy T. W., and Fuerstenau D. W.** Surfactant adsorption at the solid-liquid interface-dependence of mechanism on chain length, *J. Phys. Chem.*, 1964, Vol. 68. — P. 3562–3566.
22. **Цицилина Д. М., Кондратьев С. А.** Собираательные свойства физически сорбируемых предельных карбоновых кислот // Материалы Междунар. конф. “Проблемы комплексной и экологически безопасной переработки природного и техногенного минерального сырья” (Плаксинские чтения – 2022), Владивосток, 2022. — С. 255–258.
23. **Кондратьев С. А.** Собираательная сила и избирательность флотационного реагента // ФТПРПИ. — 2021. — № 3. — С. 133–147.
24. **Zhou F., Yan C., Wang H., Sun Q., Wang Q., and Alshameri A.** Flotation behavior of four C₁₈ hydroxamic acids as collectors of rhodochrosite, *J. Miner. Eng.*, 2015, Vol. 78. — P. 15–20.

Поступила в редакцию 27/II 2023

После доработки 10/III 2023

Принята к публикации 16/III 2023