

КАЛОИДНАЯ ХИМИЯ
COLLOIDAL CHEMISTRY

УДК 541.64
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2023-59-3-193-201>

Поступила в редакцию 23.02.2023
Received 23.02.2023

**С. В. Буча, А. Д. Воробьев, Е. В. Лаевская, П. Д. Воробьев, Н. П. Крутко,
Д. В. Чередниченко, Г. В. Бондарева**

*Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Беларусь*

**АДСОРБЦИОННЫЕ И ФЛОКУЛИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА
БИНАРНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ (СО)ПОЛИМЕРОВ АКРИЛАМИДА
И НИЗКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ АМИНОСОДЕРЖАЩИХ ПАВ В СОЛЕВОЙ СРЕДЕ**

Аннотация. Изучен процесс флокуляции кальций-магниевого твердой фазы, формирующейся в водно-солевом растворе при введении кальцийсодержащих осадителей, с использованием полиакриламида, катионного и анионного сополимеров акриламида. При введении полимеров наблюдается рост скорости осаждения дисперсии в интервале концентраций 0,5–3,0 мг/г в большей степени для анионного сополимера. В присутствии аминоксодержащего ПАВ скорость осаждения при введении полимеров увеличивается в 1,1–1,3 раза по сравнению с дисперсиями без ПАВ. На примере анионного сополимера показано, что адсорбция амина и скорость осаждения дисперсии увеличивается с ростом молекулярной массы полимера. Установлено, что на адсорбцию амина также оказывают влияние концентрации анионного сополимера и pH среды. На основании полученных данных разработан эффективный способ очистки водно-солевых растворов от аминоксодержащих ПАВ и солей магния (степень очистки 99,5–99,8 %), который может быть использован на горно-перерабатывающих предприятиях.

Ключевые слова: очистка, флотация, акриламид, алкилморфолин, собиратель, адсорбция, осаждение, хлорид натрия, полимер

Для цитирования. Адсорбционные и флокулирующие свойства бинарной системы на основе (со)полимеров акриламида и низкомолекулярных аминоксодержащих ПАВ в солевой среде / С. В. Буча [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2023. – Т. 59, № 3. – С. 193–201. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2023-59-3-193-201>

**S. V. Bucha, A. D. Vorobiev, E. V. Laevskaya, P. D. Vorobiev, N. P. Krutko,
D. V. Cherednichenko, G. V. Bondareva**

Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

**ADSORPTION AND FLOCCULATION PROPERTIES OF A BINARY SYSTEM BASED
ON (CO)POLYMERS OF ACRYLAMIDE AND LOW-MOLECULAR WEIGHT AMINE-CONTAINING
SURFACTANTS IN A SALINE MEDIUM**

Abstract. The process of flocculation of a calcium-magnesium solid phase formed in an aqueous-salt solution with the introduction of calcium-containing precipitants using polyacrylamide, cationic and anionic acrylamide copolymers was studied. With the introduction of polymers, an increase in the dispersion settling rate was observed in the concentration range of 0.5–3.0 mg/g, to a greater extent for the anionic copolymer. In the presence of an amine-containing surfactant, the sedimentation rate increased with the introduction of polymers by a factor of 1.1–1.3 compared to dispersions without surfactants. Using an anionic copolymer as an example, it was shown that the adsorption of amine and the sedimentation rate of dispersion increase with the increase of the polymer molecular weight. It was found that the concentration of the anionic copolymer and the pH of the medium also influence the adsorption of amine. Based on the obtained data, an effective method of water-salt solutions purification from amine-containing surfactants and magnesium salts (purification degree 99.5–99.8 %) that can be used at mining and processing enterprises was developed.

Keywords: purification, flotation, acrylamide, alkylmorpholine, collector, adsorption, precipitation, sodium chloride, polymer

For citation. Bucha S. V., Vorobiev A. D., Laevskaya E. V., Vorobiev P. D., Krutko N. P., Cherednichenko D. V., Bondareva G. V. Adsorption and flocculation properties of a binary system based on (co)polymers of acrylamide and low-molecular weight amine-containing surfactants in a saline medium. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2023, vol. 59, no. 3, pp. 193–201 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2023-59-3-193-201>

Введение. Для флотационного обогащения минеральных руд используют аминоксодержащие поверхностно-активные вещества (ПАВ). Адсорбционная и, как следствие, флотационная активность применяемых ПАВ зависит от их ионно-молекулярного состава. В процессе флотации сильвина в качестве флотореагентов применяют высшие алифатические амины. При отделении сильвина от каинита наиболее эффективными собирателями являются амины с короткоцепочечным алкильным радикалом, вторичные или замещенные первичные амины, гидрохлоридные или ацетатные соли аминов. В технологии переработки полигалитовых руд методом обратной флотации в качестве собирателя хлорида натрия (галита) используют циклический амин (алкилморфолин) [1–4].

В процессе флотации происходит избирательная сорбция аминов и гидрофобизация поверхности компонентов перерабатываемой руды. Гидрофобные частицы руды с пузырьками воздуха поднимаются на поверхность в составе пенного продукта. При переработке полигалитовой руды методом обратной флотации пенный продукт на основе хлорида натрия с адсорбированным на поверхности алкилморфолином выводится из технологического процесса. В составе пенного продукта, помимо флотационных реагентов, присутствуют неорганические примеси, в частности соли магния.

Принимая во внимание широкие области использования хлорида натрия, для производства более полутора тысяч веществ и материалов, включая металлический натрий, хлор, соду, соляную кислоту, гидроксид натрия, гербициды для сельского хозяйства, регенерации ионообменных смол в натрий-катионитовых фильтрах в процессах водоподготовки и т. д. [5–7], актуальной задачей является очистка выделенного в процессе флотации галита (хлорида натрия) от амина с целью его дальнейшего применения. Известные методы очистки от органических примесей (термический, окисление, сорбция на активированном угле, ионообменных смолах, силикагеле [8–10]) мало изучены для систем с высокой концентрацией низкомолекулярного электролита, кроме того, они не позволяют одновременно с органическими удалять из системы неорганические примеси.

Ранее нами была показана возможность сорбционного извлечения алкилморфолина из системы, состав которой соответствует составу щелока после растворения пенного продукта обратной флотации полигалитовой руды [11]. При введении гидроксида и оксида кальция в смеси с карбонатом натрия в системе, содержащей соли магния, формируется кальций-магниевая фаза, на поверхности которой адсорбируется алкилморфолин. Твердая фаза с адсорбированным амином флокулируется полимерами, в частности, (со)полимерами акриламида – неионогенным полимером, анионным и катионным полиэлектролитами. В концентрированных солевых и щелочных средах влияние полимеров на сорбционные свойства аминоксодержащих ПАВ и аминов на флокуляцию полимерами дисперсий солей кальция и магния изучено недостаточно. Это ограничивает возможности разработки и применения методов очистки солевых сред от аминоксодержащих и неорганических примесей и остается актуальным, в частности, для создания ресурсосберегающих технологий переработки продуктов обратной флотации, в большом количестве образующихся в процессах обогащения полиминеральных руд.

Цель данной работы – исследовать адсорбционные и флокулирующие свойства бинарной системы алкилморфолин–(со)полимер акриламида в дисперсии на основе концентрированного раствора хлорида натрия и кальций-магниевого фазы в щелочной среде в зависимости от свойств и концентрации компонентов бинарной системы, разработать метод сорбционного извлечения аминоксодержащего ПАВ в присутствии (со)полимеров акриламида в солевой среде.

Экспериментальная часть. Осаждение проводили в модельной системе, содержащей, %: NaCl – 23,42; KCl – 1,16; MgCl₂ – 1,74, остальное – вода. Для приготовления модельной системы использовали реактивы марки «х. ч.». В качестве осадителя применяли смесь гидроксида и оксида

кальция марки «ч. д. а.» с карбонатом натрия (безводный, «х. ч.»). Осаждение проводили при pH от 7,0 до 12,0, комнатной температуре и постоянном перемешивании. Жидкую и твердую фазы разделяли центрифугированием. По данным рентгенофазового анализа в состав осадка входит гидроксид магния, карбонат кальция, небольшое количество гидроксида кальция и хлорида натрия. С увеличением количества осадителя состав твердой фазы существенно не меняется.

В работе использовали полиакриламид (ПАА), анионный сополимер акриламида с акриловой кислотой (АС), катионный сополимер акриламида с триметиламмонийэтилакрилат хлоридом (КС) (производство Ashland). Молекулярная масса полимеров – $1,1 \cdot 10^7$, содержание ионно-генных функциональных групп в сополимерах – 18–20 %. Использовали также АС с молекулярной массой $1,2 \cdot 10^5$ и $3,1 \cdot 10^3$. Растворы флокулянтов с концентрацией 0,5 % готовили на дистиллированной воде, перед введением разбавляли насыщенным раствором хлорида натрия до концентрации 0,1 %. При разбавлении раствора помутнения или образования осадка не наблюдалось. Для экспериментов по флокуляции готовили дисперсию (концентрация дисперсной фазы 5 %) в растворе хлорида натрия, при перемешивании вводили в дисперсию раствор полимера. Перемешивание дисперсии в цилиндре осуществляли путем вертикального перемещения дисковой мешалки с отверстиями. Скорость осаждения (V , мм/с) определяли измерением времени перемещения границы раздела фаз в цилиндре объемом 250 мл между двумя метками на расстоянии 100 мм одна от другой с повторностью не менее трех раз с точностью $\pm 0,5$ с.

Эксперименты по сорбции аминов проводили следующим образом: 1,0 г твердой фазы приводили в контакт со 100 мл раствора хлорида натрия (4,0 М), содержащего определенное количество алкилморфолина в интервале от 0,05 до 50,0 мг/дл и диапазоне pH 7,0–12,0. Значение pH регулировали введением гидроксида натрия. Затем вводили полимер, оставляли на несколько часов для осаждения, центрифугировали. Равновесную концентрацию амина в жидкой фазе определяли спектрофотометрическим методом. Количество адсорбированного вещества, отнесенное к массе адсорбента, рассчитывали по разности исходной концентрации раствора амина и концентрации раствора после адсорбции [12].

Измерения вязкости проводили в стеклянном вискозиметре Оствальда ($d = 1,5$ мм) при $T = (25 \pm 0,2)$ °С. По концентрационной зависимости приведенной вязкости определяли характеристическую вязкость, концентрацию кроссовера C^* , которая обратно пропорциональна характеристической вязкости, и концентрацию образования флуктуационной сетки зацеплений C_e – по точке излома на графике зависимости логарифма удельной вязкости от логарифма концентрации полимера в растворе [13].

Результаты и их обсуждение. В растворе хлорида натрия, содержащем соли магния, при введении осадителя образуется кальций-магниевая твердая фаза (тв. ф.). Система характеризуется высокой агрегативной устойчивостью. При введении полимера макромолекулы, адсорбируясь одновременно на нескольких частицах твердой фазы, объединяют частицы в агрегаты, что приводит к дестабилизации дисперсии. Скорость осаждения возрастает в интервале концентраций полимера от 0,5 до 3,0 мг/г тв. ф. в большей степени при использовании АС по сравнению с ПАА и КС (рис. 1).

Скорость осаждения кальций-магниевого дисперсии полимерами увеличивается в 1,1–1,3 раза в присутствии алкилморфолина (рис. 2). Максимальное изменение скорости осаждения наблюдается при использовании бинарной системы на основе противоположно заряженных компонентов – анионного сополимера акриламида и катионного ПАВ с концентрацией последнего 5,0 и 10,0 мг/дл. Увеличение скорости осаждения дисперсии можно объяснить взаимодействием молекул алкилморфолина, адсорбированных на частицах, и макромолекул анионного сополимера. При увеличении концентрации алкилморфолина до 20,0 мг/дл скорость осаждения близка к АС без ПАВ.

Увеличение молекулярной массы АС при одинаковом содержании в системе алкилморфолина (5,0 мг/дл) и АС (2,0 мг/г тв. ф.) приводит к повышению адсорбции ПАВ и скорости осаждения дисперсии (рис. 3). Это обусловлено изменением конформационного состояния макромолекул полимеров, адсорбированных на поверхности частиц. Если время, необходимое для изменения конформации полимерной цепи, больше промежутка времени между столкновениями частиц,

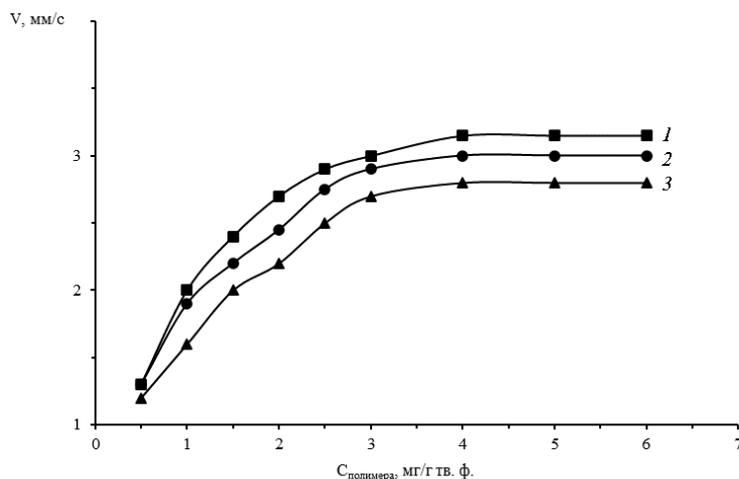


Рис. 1. Скорость осаждения дисперсии в зависимости от концентрации полимера: АС (1), ПАА (2) и КС (3)
 Fig. 1. Dispersion sedimentation rate depending on polymer concentration: AC (1), PAA (2) and KC (3)

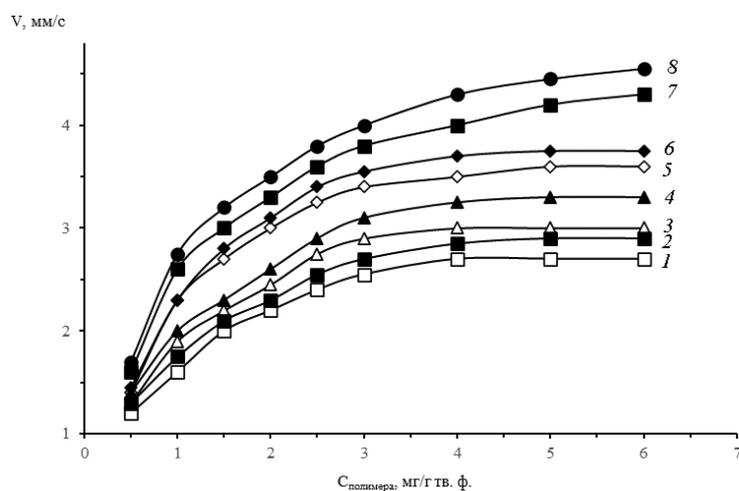


Рис. 2. Скорость осаждения дисперсии полимера: КС (1), ПАА (3), АС (5) и бинарной системой: КС+ПАВ (2), ПАА+ПАВ (4), АС+ПАВ (6–8) с концентрацией ПАВ (мг/дл): 5,0 (2, 4, 8), 10,0 (7), 20,0 (6)
 Fig. 2. The rate of sedimentation of the dispersion by polymers: KC (1), PAA (3), AC (5) and binary system: KC+surfactant (2), PAA+surfactant (4), AC+surfactant (6–8) with surfactant concentration (mg/dl): 5,0 (2, 4, 8), 10,0 (7), 20,0 (6)

то частицы будут агрегировать до того, как адсорбированные полимерные цепи достигнут равновесной конформации. В этом случае свободные фрагменты цепи адсорбированного полимера контактируют с другими частицами, что улучшает флокуляцию [14]. Этот эффект более заметен в случае увеличения молекулярной массы полимера, когда вероятность достижения равновесной конформации адсорбированных макромолекул полимера уменьшается, а вероятность образования мостичных связей между частицами возрастает.

В разбавленных растворах полимеров среднее расстояние между макромолекулами значительно превышает размеры полимерного клубка, в области условно полуразбавленных растворов взаимодействие между сегментами макромолекул приводит к образованию флуктуационной сетки зацеплений, в области концентрированных растворов макромолекулы формируют сетчатую структуру [13, 15]. Для солевого раствора анионного сополимера акриламида вискозиметрическим методом определены концентрация кроссовера C^* и область разбавленных растворов ($C < C^*$); концентрация образования флуктуационной сетки зацеплений C_e и область полуразбавленных растворов без зацеплений ($C < C_e$). При высокой концентрации низкомолекулярного электролита (NaCl, 4,0 М) и в щелочной среде $C^* < C < C_e$ для растворов АС соответствует $0,08 < C < 0,15$ (г/дл).

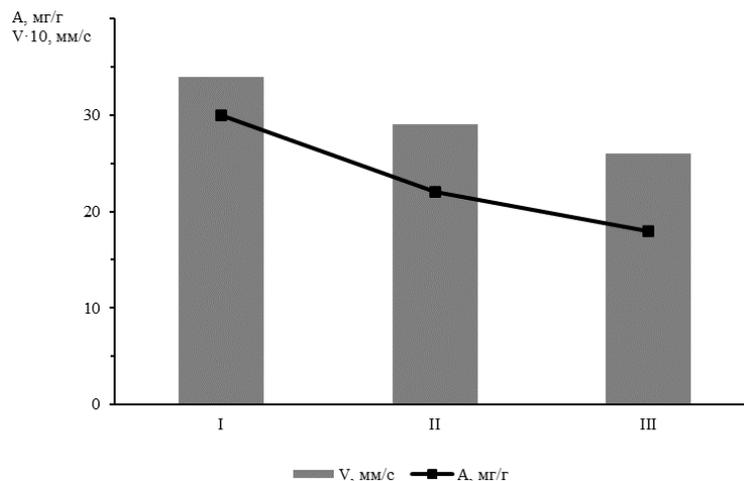


Рис. 3. Скорость осаждения дисперсии (V) и адсорбция (A) ПАВ в присутствии АС в зависимости от молекулярной массы полимера ММ, г/моль: I – $1,1 \cdot 10^7$; II – $1,2 \cdot 10^5$; III – $3,1 \cdot 10^3$

Fig. 3. The rate of dispersion sedimentation (V) and adsorption (A) of surfactants in the presence of AS, depending on the molecular weight of the polymer MM, g/mol: I – $1,1 \cdot 10^7$; II – $1,2 \cdot 10^5$; III – $3,1 \cdot 10^3$

Из рис. 4 видно, что скорость осаждения дисперсии увеличивается в интервале концентраций полимера, соответствующих области разбавленных и полуразбавленных растворов. Скорость осаждения уменьшается при увеличении концентрации полимера до 0,12–0,15 г/дл. С увеличением концентрации полимера макромолекулы взаимодействуют друг с другом и образуют сетку зацеплений, что препятствует диффузии молекул к частицам твердой фазы и адсорбции полимера на их поверхности. Уменьшение адсорбции алкилморфолина (рис. 4) с ростом концентрации полимера может быть обусловлено взаимодействием катионного ПАВ и анионного сополимера в объеме раствора.

Адсорбция алкилморфолина на поверхности частиц кальций-магниево-фазы зависит от pH. С повышением pH больше 9,0 увеличивается содержание малорастворимой молекулярной формы амина, склонной к мицеллообразованию [16]. В присутствии неорганического электролита выигрыш энергии при переходе неполярных групп ПАВ из объема на поверхность раздела фаз

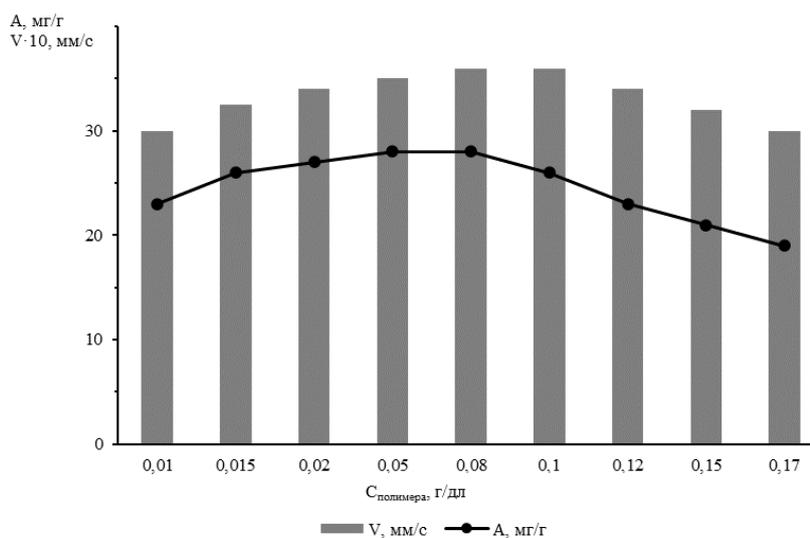


Рис. 4. Скорость осаждения (V) дисперсии АС и адсорбция (A) алкилморфолина в зависимости от концентрации полимера

Fig. 4. Sedimentation rate (V) of AS dispersion and adsorption (A) of alkylmorpholine depending on polymer concentration

или в мицеллярную фазу возрастает по сравнению с водными растворами, т. е. действие электролита сравнимо с повышением олеофильности молекул ПАВ. Присутствие электролита, увеличение концентрации амина и pH оказывают дестабилизирующее действие на растворы ПАВ, интенсифицируют мицеллообразование и фазовое разделение в системе. В присутствии АС адсорбция алкилморфолина практически не зависит от pH в интервале от 7,0 до 11,0 (рис. 5), что может быть обусловлено взаимодействием ПАВ в мицеллярной форме с макромолекулами полимера.

Установлено, что в растворе хлорида натрия в диапазоне pH 9,0–12,0 алкилморфолин может быть выделен в отдельную фазу. После извлечения амина при введении осадителя формируется неорганическая фаза, содержащая соединения кальция и магния, на поверхности которой сорбируется остаточный амин. Высокомолекулярный анионный сополимер акриламида, добавленный в дисперсную систему с неорганической фазой, взаимодействует с катионным ПАВ на поверхности и в растворе, что, с одной стороны, способствует более полному извлечению из раствора остаточного амина, с другой – улучшает агрегацию частиц твердой фазы и повышает скорость осаждения дисперсии.

На основании полученных результатов разработан метод очистки водно-солевых растворов от аминов, включающий эмульгирование амина при pH 9,0–12,0. Извлеченный из системы амин можно повторно использовать, в частности, в процессе флотации, что является преимуществом метода. Кроме того, адсорбция амина при его низких концентрациях в щелочной среде не зависит от pH (см. рис. 5), в связи с чем извлечение значительной части алкилморфолина из системы на стадии эмульгирования (85–87 %) приводит к улучшению сорбции остаточного амина.

Разработанный метод очистки водно-солевых растворов от аминоксодержащих ПАВ и солей магния включает следующие основные стадии: извлечение алкилморфолина в молекулярной форме в щелочной среде; формирование твердой фазы путем введения осадителя (оксид кальция с карбонатом натрия); флокуляция дисперсии раствором анионного сополимера; разделение фаз центрифугированием. Результаты экспериментов, проведенных в аналогичных условиях (pH, состав и количество осадителя, время перемешивания, флокуляции, температура, скорость, время центрифугирования и т. д.) при различном содержании АС в системе показали, что осветление жидкой фазы и степень очистки от алкилморфолина и солей магния достигают максимальных значений при концентрации полимера в системе 1,5–3,0 мг/г тв. ф.

Из таблицы, в которой приведены данные, характеризующие влияние анионного сополимера акриламида на состав жидкой фазы дисперсии, видно, что использование полимера (2,0 мг/г) позволяет уменьшить концентрацию алкилморфолина, неорганических примесей (магния) и содержание взвешенных частиц, очистить раствор от аминоксодержащих ПАВ и солей магния на 99,5–99,8 %.

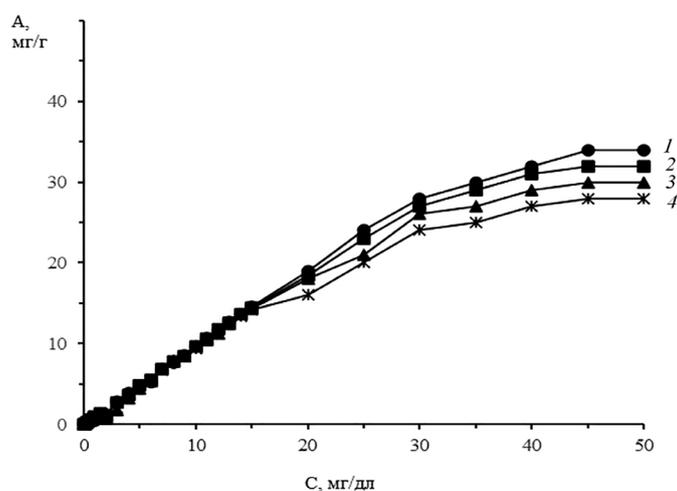


Рис. 5. Изотермы адсорбции алкилморфолина в присутствии АС при pH: 7,0 (1); 8,0 (2); 9,0 (3); 11,0 (4)

Fig. 5. Adsorption isotherms of alkylmorpholine in the presence of AS at pH: 7.0 (1); 8.0 (2); 9.0 (3); 11.0 (4)

Влияние АС на состав жидкой фазы солевой дисперсии
Influence of AS on the composition of the liquid phase of the salt dispersion

| Характеристики системы | Концентрация веществ и частиц в жидкой фазе | | |
|---|---|---------------|------------------|
| | до очистки | после очистки | |
| | | без полимера | в присутствии АС |
| Концентрация алкилморфолина, мг/дл | 18,0 | 0,4 | 0,01 |
| Концентрация ионов магния, г/дл | 0,44 | 0,37 | 0,002 |
| Содержание взвешенных частиц (до и после флокуляции АС), мг/л | 255,4 | 164,0 | 0,8 |
| Концентрация хлорида натрия, г/дл | 234,2 | 233,4 | 233,8 |

Метод сорбционного извлечения аминоксодержащего ПАВ в присутствии (со)полимеров акриламида в солевой среде может быть использован для очистки побочного продукта обратной флотации, образующегося в процессе обогащения полигалитовых руд с целью получения и дальнейшего использования хлорида натрия. Амины, извлеченные из водно-солевого раствора, могут быть повторно использованы, в частности, в процессе флотации полиминеральной руды.

Заключение. Установлено, что эффективность флокулирующего действия (со)полимеров акриламида в отношении дисперсии, содержащей концентрированный раствор хлорида натрия (4 М) и частицы кальций-магниевого фазы, возрастает в 1,1–1,3 раза в присутствии низкомолекулярного аминоксодержащего ПАВ (алкилморфолина). Увеличение молекулярной массы полимера и его концентрации до 0,12 г/дл приводит к повышению адсорбции ПАВ и скорости осаждения дисперсии. При pH выше 9,0 увеличивается содержание малорастворимой молекулярной формы амина, в связи с чем уменьшается его адсорбция. В присутствии анионного сополимера акриламида адсорбция алкилморфолина мало зависит от pH.

Разработан метод очистки водно-солевых растворов от аминоксодержащих ПАВ и солей магния с использованием анионного сополимера акриламида, преимуществом которого является не только значительное улучшение флокуляции кальций-магниевого дисперсии, но и увеличение адсорбции амина на поверхности дисперсной фазы вследствие взаимодействия полиэлектролита и катионного ПАВ.

Список использованных источников

1. Совершенствование технологии флотационного обесшламливания высокоглинистых калийных руд / Е. И. Алексеева [и др.] // Обогащение руд. – 2007. – № 2. – С. 10–14.
2. Титков, С. Н. Технология и физико-химические особенности флотации водорастворимых минералов / С. Н. Титков // Обогащение руд. – 2002. – № 1. – С. 10–15.
3. Богданов, О. С. Физико-химические основы теории флотации / О. С. Богданов, А. М. Гольман. – М.: Наука, 1983. – 264 с.
4. Флотация калийных руд с использованием композиций на основе солей высших алифатических аминов и различных модификаторов / Е. О. Осипова [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2013. – № 3. – С. 18–22.
5. Product and by-product formation in electrolysis of dilute chloride solutions / A. M. Polcaro [et al.] // J. Appl. Electrochem. – 2008. – Vol. 38, № 7. – P. 979–984. <https://doi.org/10.1007/s10800-008-9509-3>
6. Аблонин, Б. Е. Основы химических производств / Б. Е. Аблонин. – М.: Химия, 2001. – 563 с.
7. Рябчиков, Б. Е. Современные методы подготовки воды для промышленного и бытового использования / Б. Е. Рябчиков. – М.: ДеЛи принт, 2004. – 301 с.
8. Шкуратов, А. Л. Получение сорбентов и мембран на основе природных силикатов для очистки растворов от загрязнителей различной природы: автореф. дис. ... канд. хим. наук: 03.02.08 / А. Л. Шкуратов; Рос. акад. наук, Дальневост. федер. ун-т. – Владивосток, 2018. – 23 с.
9. Шабанова, Н. В. Сорбционное удаление ароматических аминов из воды различных источников / Н. В. Шабанова // Экол. системы и приборы. – 2005. – № 6. – С. 20–25.
10. Житенёв, Б. Н. Очистка воды от стойких органических примесей окислительными технологиями / Б. Н. Житенёв, А. Д. Гуринович. – Брест: Изд-во БрГТУ, 2019. – 180 с.
11. Сорбционное извлечение аминов из солевых растворов в методах очистки вторичных продуктов обогащения минерального сырья / П. Д. Воробьёв [и др.] // Природ. ресурсы. – 2021. – № 2. – С. 86–91.

12. Савицкая, Т. А. Практикум по коллоидной химии: учеб. пособие / Т. А. Савицкая, М. П. Шиманович. – Минск: БГУ, 2003. – 100 с.
13. Гидродинамические и адсорбционные свойства анионных сополимеров акриламида в солевых растворах и дисперсиях / Д. Н. Давлюд [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук. – 2019. – Т. 55. – № 4. – С. 455–463. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-4-455-463>
14. Nasser, M. S. Effect of polyelectrolytes on the degree of flocculation of papermaking suspensions / M. S. Nasser, F. A. Twaiq, S. A. Onaizi // Separation and Purification Technology. – 2013. – Vol. 103. – P. 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.10.024>
15. Литманович, А. А. Растворы полимеров / А. А. Литманович, О. Е. Литманович. – М.: Ротапринт МАДИ, 2010. – 69 с.
16. Laskowski, J. S. From amine molecules adsorption to amine precipitate transport by bubbles: A potash ore flotation mechanism / J. S. Laskowski // Minerals Engineering. – 2013. – Vol. 45. – P. 170–179. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.02.010>

References

1. Alekseeva Ye. I., Konoplyov Ye. V., Panteleeva N. N., Titkov S. N. High-clayey potash ores flotation desliming technology improvement. *Obogashhenie Rud*, 2007, no. 2, pp. 10–14 (in Russian).
2. Titkov S. N. Technology and physico-chemical features of flotation of water-soluble minerals. *Obogashhenie Rud*, 2002, no. 1, pp. 10–15 (in Russian).
3. Bogdanov O. S., Gol'man A. M. *Physical and Chemical Foundations of the Theory of Flotation*. Moscow, Nauka Publ., 1983. 264 p. (in Russian).
4. Osipova E. O., Shlomina L. F., Dihtievskaja L. V., Drozdova N. A., Shevchuk V. V. Flotation of potash ores using compositions based on higher aliphatic amines' salts. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnyh navuk = Proceedings of the National Academy of Science of Belarus. Chemical series*, 2013, no. 3, pp. 18–22 (in Russian).
5. Polcaro A. M., Vacca A., Mascia M., Ferrara F. Product and by-product formation in electrolysis of dilute chloride solutions. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2008, vol. 38, no. 7, pp. 979–984. <https://doi.org/10.1007/s10800-008-9509-3>
6. Ablonin B. E. *Fundamentals of Chemical Production*. Moscow, Khimiya Publ., 2001. 563 p. (in Russian).
7. Ryabchikov B. E. *Modern Methods of Water Treatment for Industrial and Domestic Use*. Moscow, Deli Print Publ., 2004. 301 p. (in Russian).
8. Shkuratov A. L. *Obtaining Sorbents and Membranes Based on Natural Silicates for Cleaning Solutions from Pollutants of Various Nature*. Vladivostok, 2018. 23 p. (in Russian).
9. Shabanova N. V. Sorption removal of aromatic amines from water of various sources. *Ekologicheskie sistemy i pribory = Ecological Systems and Devices*, 2005, no. 6, pp. 20–25 (in Russian).
10. Zhitenyov B. N., Gurinovich A. D. *Purification of Water from Persistent Organic Impurities by Oxidizing Technologies*. Brest, BrGTU Publ., 2019. 180 p. (in Russian).
11. Vorobyov P. D., Bucha S. V., Cherednichenko D. V., Vorobyova E. V., Krutko N. P., Astahova M. A. Sorption extraction of amines from salt solutions in secondary product purification methods mineral processing. *Privodnye resursy = Natural Resources*, 2021, no. 2, pp. 86–91 (in Russian).
12. Savitskaya T. A., Shimanovich M. P. *Workshop on Colloid Chemistry*. Minsk, BSU, 2003. 100 p. (in Russian).
13. Davlyud D. N., Vorobiev P. D., Lipaj Yu. V., Vorobieva E. V., Bucha S. V., Chernikova A. R. Hydrodynamic and Adsorption Properties of Anionic Acrylamide Copolymers in Water-Salt Media. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnyh navuk = Proceedings of the National Academy of Science of Belarus. Chemical series*, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 455–463 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-4-455-463>
14. Nasser M. S., Twaiq F. A., Onaizi S. A. Effect of polyelectrolytes on the degree of flocculation of papermaking suspensions. *Separation and Purification Technology*, 2013, vol. 103, pp. 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.10.024>
15. Litmanovich A. A., Litmanovich O. E. *Polymer Solution*. Moscow, Rotaprint MADI, 2010. 69 p. (in Russian).
16. Laskowski J. S. From amine molecules adsorption to amine precipitate transport by bubbles: A potash ore flotation mechanism. *Minerals Engineering*, 2013, vol. 45, pp. 170–179. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.02.010>

Информация об авторах

Буча Светлана Васильевна – науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: bucha1003@gmail.com

Воробьев Артем Дмитриевич – канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: avorobiov@igic.bas-net.by

Лавевская Елена Васильевна – канд. техн. наук, зав. лаб. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: layeuskaya@gmail.com

Information about the authors

Bucha Sviatlana V. – Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bucha1003@gmail.com

Vorobiev Artem D. – Ph. D. (Engineering), Leading Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: avorobiov@igic.bas-net.by

Layevskaya Elena V. – Ph. D. (Engineering), Head of the Laboratory. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (Surga-

Воробьев Павел Дмитриевич – канд. хим. наук, вед. науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: pdvc@tut.by

Крутко Николай Павлович – академик, д-р хим. наук, профессор, ген. директор государственного научно-производственного объединения «Химические продукты и технологии» (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: krutko@igic.bas-net.by

Чередниченко Денис Викторович – канд. хим. наук, вед. науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: cherednichenko_dv@tut.by

Бондарева Галина Валерьевна – канд. хим. наук, уч. секретарь. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sekretar@igic.bas-net.by

nov Str., 9/1, 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: layeuskaya@gmail.com

Vorobiev Pavel D. – Ph. D. (Chemistry), Leading Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pdvc@tut.by

Krutko Nikolay P. – Academician, D. Sc. (Chemistry), Professor, Director General of the State Research and Production Association «Chemical Products and Technologies» (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: krutko@igic.bas-net.by

Cherednichenko Denis V. – Ph. D. (Chemistry), Leading Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: cherednichenko_dv@tut.by

Bondareva Halina V. – Ph. D. (Chemistry), Scientific Secretary. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sekretar@igic.bas-net.by