

КАЛОИДНАЯ ХИМИЯ
COLLOIDAL CHEMISTRYУДК 622.765.06
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2026-62-1-17-25>Поступила в редакцию 21.11.2024
Received 21.11.2024**Е. О. Осипова, В. В. Шевчук***Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Беларусь***ВЛИЯНИЕ СОЛЕВОЙ СРЕДЫ НА КОЛЛОИДНО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
АЛКИЛМОРФОЛИНА ПРИ ФЛОТАЦИОННОМ ОБОГАЩЕНИИ
ПОЛИМИНЕРАЛЬНЫХ РУД**

Аннотация. Исследования поверхностного натяжения на границе раздела водный и солевой раствор солянокислого Армфлоте 619–воздух показали, что соль алкилморфолина не склонна к высаливанию даже в насыщенных растворах. При изучении пенообразующей способности солянокислой соли Армфлоте 619 как в водных, так и в солевых растворах, вплоть до насыщенных, показана высокая устойчивость соли Армфлоте 619 к высаливающему действию неорганических электролитов. Для обогащения полиминеральной руды подобран оптимальный состав и плотность маточника, который представляет собой водный раствор хлорида магния с плотностью 1 295 кг/м³, дополнительно насыщенный рудой до плотности 1 305 кг/м³. Установлено, что использование подкисленных маточных растворов с pH 3–4 позволяет повысить извлечение галита в пенный продукт до 95–96 %. Кислая среда маточного раствора приводит к снижению потерь KCl в 1,3 раза и Mg₂SO₄ в 2,8 раза. Накопление алкилморфолина в маточных растворах способствует снижению расхода собирателя при флотации в оборотных рассолах: если в первичном рассоле из руды при расходе алкилморфолина 460 г/т можно извлечь в пенный продукт 89,55 % хлорида натрия, то при проведении флотации в маточнике 8-го оборотного цикла при расходе 160 г/т руды его извлекается 94,57 %.

Ключевые слова: флотационное обогащение, полиминеральная руда, карналлит-каинит-галитовая руда, собиратель, катионные поверхностно-активные вещества, поверхностное натяжение, пенообразование, галит, извлечение

Для цитирования. Осипова, Е. О. Влияние солевой среды на коллоидно-химические свойства алкилморфолина при флотационном обогащении полиминеральных руд / Е. О. Осипова, В. В. Шевчук // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя хімічных навук. – 2026. – Т. 62, № 1. – С. 17–25. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2026-62-1-17-25>

Е. О. Osipova, V. V. Shevchuk*Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus***EFFECT OF SALT ENVIRONMENT ON THE COLLOID CHEMICAL PROPERTIES
OF ALKYL-MORPHOLINE IN FLOTATION ENRICHMENT OF POLIMINERAL ORES**

Abstract. Studies of the surface tension at the interface between aqueous and saline solution of hydrochloric acid Armoflote 619–air have shown that the salt of alkylmorpholine is not prone to precipitation even in saturated solutions. The study of the foaming ability of the hydrochloric acid salt of Armoflote 619 in both aqueous and saline solutions, up to saturated ones, showed the high resistance of the salt of Armoflote 619 to the precipitating effect of inorganic electrolytes. For the enrichment of polymineral ore the optimal composition and density of the flotation solution were selected. It is a water magnesium chloride solution with a density of 1 295 kg/m³, presaturated with ore to a density of 1 305 kg/m³. It has been established that the use of acidified flotation solution with pH 3–4 leads to an increase in the extraction of halite into the foam product. The recovery of NaCl is 95–96 %. The acidic environment of the flotation solution leads to a decrease in KCl losses by 1.3 times and MgSO₄ by 2.8 times. The accumulation of alkylmorpholine in flotation solution helps to reduce the collector consumption during flotation in circulating brines: if in the primary brine 89,55 % of sodium chloride can be extracted from the ore at the consumption of alkylmorpholine of 460 g/t, then during flotation in the brine of the 8th recirculating cycle at the consumption of 160 g/t of ore, 94,57 % of it is extracted.

Keywords: flotation enrichment, polymineral ores, carnallite-kainite-halite ore, collector, cationic surfactants, surface tension, foaming, halite, recovery

For citation. Osipova E. O., Shevchuk V. V. Effect of salt environment on the colloid chemical properties of alkil-morfoline in flotation enrichment of polimineral ores. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2026, vol. 62, no. 1, pp. 17–25 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2026-62-1-17-25>

Введение. В настоящее время более 80 % мирового запаса калийных руд обогащается с применением пенной флотации. Извлечение хлорида калия из смеси хлорида натрия и других минералов пустой породы происходит прямым способом, то есть концентрат извлекается с пеной. Но, как показывает практика горнодобывающей промышленности, существуют различные типы калийсодержащих руд, что обуславливает необходимость применения различных методов и технологий их обогащения. Следовательно, выбор метода обогащения определяется вещественным составом и характером вкрапленности минералов. Калийсодержащие руды в основной своей массе относятся к бедным вкрапленным рудам с преобладанием в качестве пустой породы галита. Существуют полиминеральные руды, в которых содержание галита меньше 50 % и почти отсутствует нерастворимый остаток. Такие руды целесообразно обогащать путем флотации пустой породы – обратной флотацией [1–4].

В последние 20 лет направление переработки водорастворимых полезных ископаемых интенсивно развивается [5, 6]. Флотация галита применяется на калийных предприятиях Израиля (Dead Sea Works) и Иордании (Arab Potash) для переработки садовых солей сложного состава Мертвого моря [7], Ирана – для переработки садовых солей карналлитового типа. В научно-исследовательском и проектном институте галургии (Санкт-Петербург) и ОАО «Сильвинит» (Россия) с использованием процесса флотации галита разработана технология флотационного обогащения карналлитовых руд Верхнекамского месторождения с получением обогащенного карналлита (массовая доля $MgCl_2$ – 31–32 %) в виде камерного продукта галитовой флотации. Однако ввиду низкой эффективности данная технология не получила практической реализации [8].

С целью повышения извлечения галита в пенный продукт ведутся работы по поиску эффективного реагента-собираателя. Новое поверхностно-активное вещество (ПАВ) Gemini на основе морфолина – 1,4-бис(морфолин додецил аммоний)бутан дибромид (БМБД) первоначально было рекомендовано в качестве собирателя для обратной пенной флотации галита из карналлитовой руды [9, 10]. Результаты флотации показали, что БМБД дает более высокий флотационный выход и более сильное сродство к галиту по сравнению с обычным мономерным ПАВ N-(н-додецил) морфолином (ДДМ). На данный момент единственным доступным собирателем для галита, применяемым на производстве, является N-алкилморфолин. Производство N-алкилморфолина налажено в Швеции (Akso Nobel) под названием Armoflote 619.

В ИОНХ НАН Беларуси в последние годы активно проводилась разработка флотационного разделения солей из полиминеральных руд. Предложена технология переработки¹, первая стадия которой – извлечение галита в пенный продукт. В качестве собирателя галита использовали солянокислый раствор алкилморфолина Armoflote 619.

Основная информация о составе флотореагента Armoflote 619 нами получена из хроматографического анализа, данных ЯМР 1H , ^{13}C и масс-спектров. Установлено, что в составе коммерческого продукта Armoflote 619 присутствуют два основных компонента в соотношении 69,36 и 30,64 %, т. е. ~2,3 : 1. Содержание примесей незначительно. В масс-спектре наблюдаются пики, соответствующие составу $C_{16}H_{33}NO$ и $C_{18}H_{37}NO$. Таким образом, основные компоненты вещества – алкилморфолины с алкильными радикалами $C_{12}H_{25}$ и $C_{14}H_{29}$. Флотореагент Armoflote 619 представляет собой двухкомпонентную смесь N-алкилированных морфолинов с нормальными насыщенными алифатическими цепями. Уникальность реагента состоит в том, что он одновременно является и собирателем, и пенообразователем, и модификатором.

¹ См.: Патент WO/2016/134435, МПК C05D 1/00 2006.1. Способ переработки полиминеральных руд с получением сульфата калия : № РСТ/ВУ2015/000002 : заявлено : 25.02.2015 : опубл. 01.09.2016 / Н. П. Крутько, А. Д. Смычник, В. В. Шевчук, П. А. Яковлев ; заявители : Ин-т общей и неорганической химии НАН Беларуси; ООО «СТРИКТУМ». – 16 с.

В настоящей статье излагаются результаты исследования коллоидно-химических и флотационных свойств алкилморфолина Armoflote 619 в растворах солей, входящих в состав флотационного рассола.

Экспериментальная часть. Раствор Armoflote 619 готовили следующим образом: к навеске алкилморфолина добавляли немного воды, нагревали до 50 °С и затем вводили 33%-ю соляную кислоту. По завершении процесса омыления из полученной эмульсии готовили рабочий раствор реагента путем ее разбавления водой с температурой 50 °С до необходимой концентрации. В холодном состоянии рабочий раствор реагента текучий и полупрозрачный, в процесс флотации реагент вводили подогретым до 50 °С.

Для сравнительной характеристики поверхностных свойств Armoflote 619 в различных солевых растворах изучали поверхностное натяжение (σ) на границе раздела фаз раствор–воздух при 20 °С с использованием метода отрыва пластинки.

Пенообразующую способность водных и солевых растворов алкилморфолина изучали методом встряхивания. Определенный объем водного или солевого раствора Armoflote 619 (20 мл) в цилиндрах объемом 100 см³ встряхивали 10 с. Пенообразование оценивали по высоте пены.

Сорбционную активность и собирательное действие алкилморфолина исследовали с помощью флотационных опытов на лабораторной флотационной машинке типа «Механобр» в насыщенном рассоле с навеской руды 50 г и Ж : Т = 4.

Для приготовления растворов электролитов использовали химически чистые соли KCl, NaCl и MgCl₂ · 6H₂O. Флотационный рассол – это водный раствор хлорида магния с плотностью 1,295 кг/м³, дополнительно насыщенный рудой до плотности 1,305 кг/м³ (табл. 1). Флотация галита проходит в насыщенном рассоле KCl-NaCl-MgCl₂-MgSO₄-H₂O [1, 11].

Результаты и их обсуждение. Проведены исследования поверхностного натяжения в различных по составу насыщенных солевых растворах (рис. 1), по результатам которых можно сделать вывод о высокой устойчивости реагента к высаливающему действию в растворах различных электролитов.

Растворы электролитов влияют на поверхностные свойства солянокислого алкилморфолина, т. е. снижают поверхностное натяжение и повышают адсорбцию собирателя на границе раздела раствор–воздух, а также снижают концентрацию насыщения адсорбционного слоя и критическую концентрацию мицеллообразования собирателя. Реагент Armoflote 619 способен образовывать плотные адсорбционные слои на границе раздела раствор–воздух и создавать условия и возможность для прочного закрепления галитовых частиц на пузырьке воздуха и выноса их в пенный продукт. В системах, содержащих солянокислую соль Armoflote 619, равновесие на поверхности раздела фаз наступает достаточно быстро в сравнении с растворами алифатических аминов, применяемых для обогащения калийных руд.

На флотуемость галита существенное влияние оказывает состав рассола. Исследовано пенообразование Armoflote 619 в разных по составу флотационных рассолах при различных температурах (рис. 2): раствор I – для флотации полиминеральной руды (27,9 % MgCl₂, 1,27 % NaCl, 0,98 % KCl, 1,91 % MgSO₄,

Таблица 1. Состав солевого рассола

Table 1. Composition of salt brine

Состав	MgCl ₂	NaCl	KCl	MgSO ₄	H ₂ O
Содержание, %	27,9	1,27	0,98	1,41	68,44

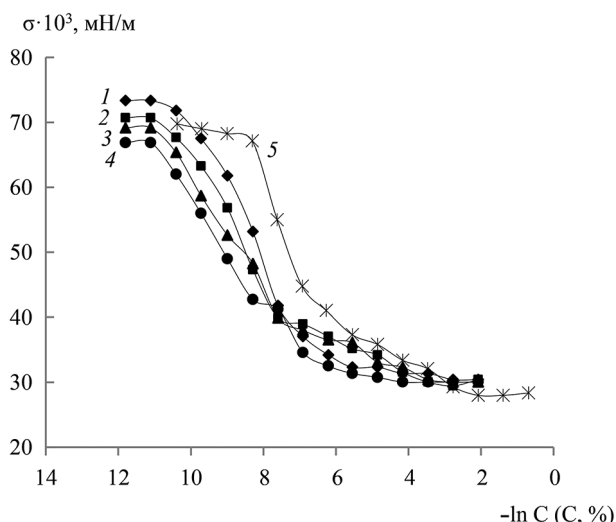


Рис. 1. Изотермы поверхностного натяжения солянокислого Armoflote 619 в насыщенных растворах: 1 – KCl, 2 – NaCl, 3 – KCl · NaCl, 4 – MgCl₂, 5 – вода

Fig. 1. Surface tension isotherms of hydrochloric acid Armoflote 619 in saturated solutions: 1 – KCl, 2 – NaCl, 3 – KCl · NaCl, 4 – MgCl₂, 5 – water

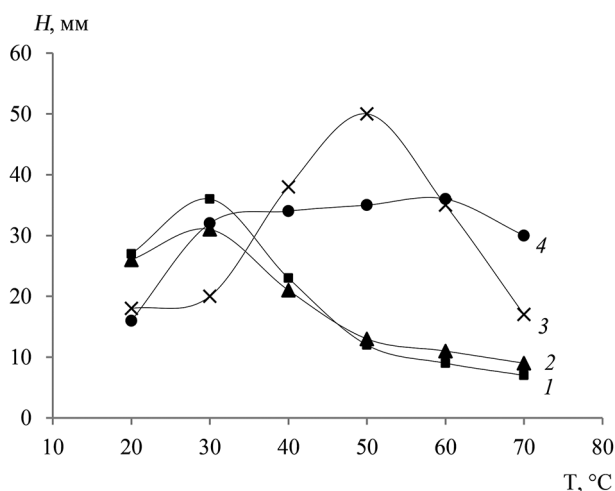


Рис. 2. Влияние солевых растворов на пенообразование алкилморфолина ($C = 0,5\%$) в различных насыщенных растворах солей при различных температурах: 1 – раствор II; 2 – раствор III, 3 – раствор I, 4 – раствор $MgCl_2$

Fig. 2. The effect of saline solutions on the foaming of alkylmorpholine ($C = 0,5\%$) in various saturated salt solutions at different temperatures: 1 – solution II, 2 – solution III, 3 – solution I, 4 – solution $MgCl_2$

Исследования пенообразующей способности солянокислой соли Armoflote 619 в растворах хлорида магния как в водных, так и солевых, вплоть до насыщенных, подтвердили высокую устойчивость соли Armoflote 619 к высаливающему действию электролита (рис. 3).

Сорбционная активность алкилморфолина зависит от солевого состава полиминеральных руд. С этой целью проведены эксперименты по изучению адсорбции алкилморфолинов Armoflote 619 на различных минералах (индивидуальных солях), входящих в состав полиминеральных руд. Опыты показали преимущественную сорбцию собирателя на хлориде натрия, следовательно, и лучшую флотацию. Сорбционную активность алкилморфолина оценивали по выходу продукта в процессе флотации. Флотацию проводили в двух видах солевых растворов: в насыщенном

68,44 % H_2O), раствор II – сильвинитовый раствор (10,4 % KCl , 20,7 % $NaCl$, 68,9 % H_2O), раствор III – насыщенный раствор хлорида натрия (26,4 % $NaCl$, 73,6 % H_2O).

Влияние электролитов на пенообразующую и флотационную способности алкилморфолина объясняется различным коллоидно-мицеллярным состоянием собирателя в этих растворах. Важным наблюдением в процессе работы являлось то, что растворы алкилморфолина в растворе $MgCl_2$ были прозрачными, а растворы с $NaCl$ – мутнели с течением времени. Можно сделать вывод, что алкилморфолины менее устойчивы в растворе $NaCl$, что делает этот электролит неэффективным в роли маточного раствора для флотации галита. Это доказывают и проведенные исследования флотации хлорида натрия в различных рассолах [12]. Показано, что наибольшая флотируемость галита наблюдалась в рассоле с хлоридом магния, а в насыщенном растворе хлорида натрия флотация почти не происходила. Флотацию галита эффективно проводить в водном растворе $MgCl_2$ с добавлением руды.

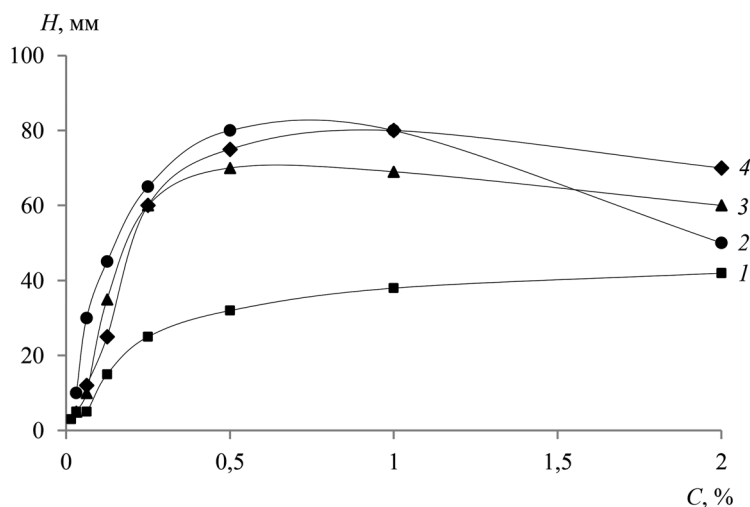


Рис. 3. Изотермы вспениваемости растворов солянокислого алкилморфолина в растворах хлорида магния: 1 – 30 % $MgCl_2$, 2 – 0,1N $MgCl_2$, 3 – 0,01N $MgCl_2$, 4 – водный раствор алкилморфолина

Fig. 3. Foaming isotherms of alkylmorpholine hydrochloride solutions in magnesium chloride solutions: 1 – 30 % $MgCl_2$, 2 – 0,1N $MgCl_2$, 3 – 0,01N $MgCl_2$, 4 – water solution

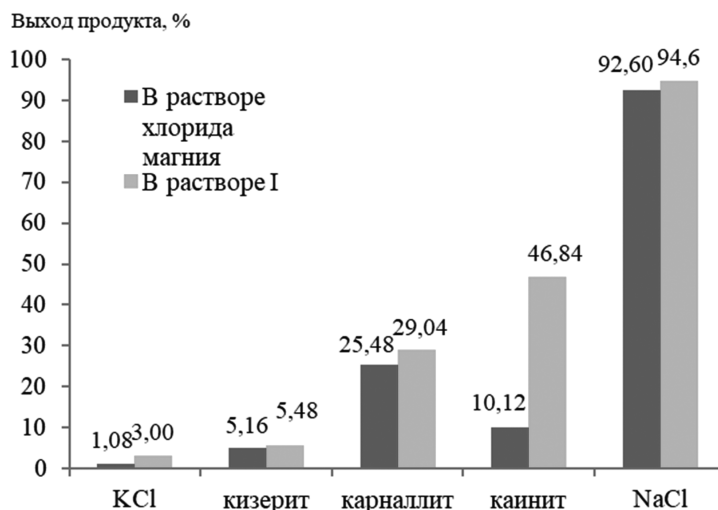


Рис. 4. Влияние алкилморфолина на выход солей в пенный продукт

Fig. 4. The effect of the alkylmorpholine on the yield of salts in the foam product

растворе $MgCl_2$ ($\rho = 1,295 \text{ кг/м}^3$) и в растворе I (27,9 % $MgCl_2$, 1,27 % NaCl, 0,98 % KCl, 1,91 % $MgSO_4$, 68,44 % H_2O , $\rho = 1,305 \text{ кг/м}^3$). Каждый минерал предварительно сушили и отсеивали фракцию $-0,5 + 0 \text{ мм}$. Ввиду высокой вязкости солевых растворов $MgCl_2$ во флотационных опытах Ж : Т = 4. Перемешивание минерала с рассолом длилось 3 мин при 1 500 об/мин, затем вводили собиратель 100–1 000 г/т (0,5% раствор Armoflote 619, приготовленный в растворе $MgCl_2$) и перемешивали еще 5 мин. Флотацию проводили 10 мин при 1 800 об/мин с дополнительной подачей воздуха. После флотации пенный и камерный продукты фильтровали и сушили при 60 °С.

Проведенные исследования флотационной активности минеральных составляющих полиминеральной руды показали, что в наибольшей степени алкилморфолин сорбировал галит NaCl, в наименьшей – KCl (рис. 4). В ходе эксперимента также установлено, что в насыщенном растворе $MgCl_2$ происходило частичное растворение некоторых минералов, а именно карналлита, каинита и кизерита. Растворение связано с тем, что рассол продолжал насыщаться. При исследовании сорбции алкилморфолина в растворе I растворения не происходило. Это подтверждает тот факт, что при более низких плотностях рассола наблюдается растворение руды, поэтому важным параметром флотации полиминеральной руды является плотность рассола.

Так как полиминеральные руды по минералогическому анализу в основном состоят из карналлита ($KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$), галита (NaCl), каинита ($KCl \cdot MgSO_4 \cdot 3H_2O$), кизерита ($MgSO_4 \cdot H_2O$) и ангидрита ($CaSO_4$), то в процессе флотации галита нежелательны потери с пенным продуктом сульфатсодержащих и калийсодержащих минералов для дальнейшей переработки и получения ценных удобрений. Известно [13], что в кислой среде подавляется флотация кизерита ($MgSO_4 \cdot H_2O$), поэтому представляло интерес изучение влияния pH маточника на флотацию каинита ($KCl \cdot MgSO_4 \cdot 3H_2O$) как сульфатсодержащего минерала.

Флотационные опыты проводили при расходе алкилморфолина 460 г/т руды на первичном маточнике, время флотации – 12 мин, фракция руды – 0,4 мм. Состав руды: KCl – 17,4 %, NaCl – 41,6 %, $MgSO_4$ – 8,6 %, $MgCl_2$ – 13,2 %. Результаты исследований представлены в табл. 2.

Подкисление маточного раствора до pH 3,5 позволило снизить потери с извлечением хлорида калия с пенным продуктом на 4,34 %, а так как хлорид калия входит в состав каинита и карналлита, то уменьшить потери и этих минералов, о чем свидетельствовали показатели извлечения сульфатов и хлорида магния в пенный продукт (см. табл. 2). Так, потери хлорида магния (карналлита) уменьшились на 2,14 %, а потери сульфатсодержащего минерала – примерно в 3 раза. Такое существенное снижение потерь сульфатов указывало на подавление их флотации в кислой среде. При pH маточника 2,5 существенных изменений в процессе флотации не происходило, поэтому нет необходимости применения столь кислых рассолов. Оптимальным pH маточника являлся показатель 3,5, при котором при расходе алкилморфолина 460 г/т руды достигались наи-

Таблица 2. Влияние pH рассола на флотацию галита из полиминеральной руды (KCl – 17,4 %, NaCl – 41,6 %, MgSO₄ – 8,6 %, MgCl₂ – 13,2 %)Table 2. Effect of pH on the flotation of halite from polymineral ore (KCl – 17,4 %, NaCl – 41,6 %, MgSO₄ – 8,6 %, MgCl₂ – 13,2 %)

Расход Armoflote 619, г/т руды	pH рассола	Продукт	Выход продукта, %	Показатели флотации галита							
				Содержание, мас.%				Извлечение, мас.%			
				NaCl	KCl	MgSO ₄	MgCl ₂	NaCl	KCl	MgSO ₄	MgCl ₂
460	6,5	Пенный	52,31	76,31	4,49	10,80	3,55	95,97	13,50	67,02	14,17
		Камерный	47,69	3,52	31,56	5,82	23,58	4,03	86,50	32,98	85,83
460	5,5	Пенный	51,38	77,79	4,32	8,47	3,60	96,08	12,77	50,76	14,12
		Камерный	48,62	3,36	31,52	8,52	23,32	3,92	87,23	49,24	85,88
460	4,5	Пенный	49,82	80,39	3,83	5,50	3,67	96,27	10,98	32,13	13,95
		Камерный	50,18	3,08	30,86	11,38	22,46	3,73	89,02	67,87	86,05
460	3,5	Пенный	45,48	88,10	3,52	3,91	3,47	96,32	9,16	21,17	12,03
		Камерный	54,52	2,81	28,98	12,15	20,77	3,68	90,84	78,83	87,96
460	2,5	Пенный	46,20	84,41	3,52	3,90	3,40	95,96	9,32	21,45	12,08
		Камерный	53,80	3,12	29,43	12,26	21,25	4,13	90,68	78,55	87,92

лучшие показатели флотации галита и наименьшие потери калий- и сульфатсодержащих компонентов руды.

Известно, что на производстве флотационные процессы проходят в замкнутом цикле, при котором неизбежно от цикла к циклу в рассолах будут накапливаться реагенты, используемые в процессе. Учитывая способность алкилморфолина растворяться в насыщенных растворах электролитов, были проведены исследования по накоплению алкилморфолина в циклических флотационных опытах. Первичный рассол считали как цикл I.

Накопление флотореагентов изучали при оптимальных условиях: pH маточника – 3,5, фракция руды – 0,5 мм, оптимум алкилморфолина – 460 г/т руды, время флотации – 9 мин. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3. Показатели флотации полиминеральной руды при накоплении алкилморфолина Armoflote 619 в оборотных рассолах

Table 3. Indicators of polymineral ore flotation at accumulation of alkylmorpholine Armoflote 619 in circulating brines

Расход Armoflote 619, г/т руды	Цикл рассола	Продукт	Выход продукта, %	Показатели флотации							
				Содержание, мас.%				Извлечение, мас.%			
				NaCl	KCl	MgSO ₄	MgCl ₂	NaCl	KCl	MgSO ₄	MgCl ₂
460	I	Пенный	42,89	86,85	3,09	3,84	3,01	89,55	7,56	19,46	9,78
		Камерный	57,11	7,61	28,42	11,96	20,85	10,45	92,44	80,54	90,22
460	II	Пенный	43,61	86,13	3,65	4,12	3,14	90,29	9,11	21,21	10,38
		Камерный	56,39	7,16	28,14	11,82	20,98	9,71	90,89	78,79	89,62
460	III	Пенный	46,11	84,59	3,85	4,45	3,12	93,76	10,16	24,35	10,91
		Камерный	53,89	4,82	29,11	11,82	21,82	6,24	89,84	75,65	89,09
400	IV	Пенный	47,11	83,07	4,14	4,86	3,33	94,07	11,19	26,97	11,91
		Камерный	52,89	4,67	29,27	11,72	21,93	5,93	88,81	73,03	88,09
340	V	Пенный	47,48	82,56	4,37	4,91	3,33	94,23	11,87	28,38	11,98
		Камерный	52,52	4,57	29,30	11,60	22,12	5,77	88,13	71,62	88,02
280	VI	Пенный	46,57	85,09	3,84	5,33	3,02	95,26	10,24	29,45	10,65
		Камерный	53,43	3,69	29,33	11,12	22,06	4,74	89,76	70,55	89,35
220	VII	Пенный	46,26	84,95	3,80	5,40	3,05	94,74	10,07	29,76	10,69
		Камерный	53,74	4,06	29,22	10,98	21,94	5,26	89,93	70,24	89,31
160	VIII	Пенный	46,13	85,28	4,04	5,49	3,00	94,57	10,67	30,10	10,56
		Камерный	53,87	4,19	28,95	10,92	21,93	5,43	89,33	69,90	89,44
100	IX	Пенный	44,06	85,85	3,82	5,38	2,83	90,93	9,64	28,19	9,44
		Камерный	55,94	6,74	28,20	10,78	21,36	9,07	90,36	71,81	90,55

Расход Агмофлоте 619, г/т руды	Цикл рассола	Продукт	Выход продукта, %	Показатели флотации							
				Содержание, мас.%				Извлечение, мас.%			
				NaCl	KCl	MgSO ₄	MgCl ₂	NaCl	KCl	MgSO ₄	MgCl ₂
40	X	Пенный	42,43	85,59	3,58	4,90	2,79	87,29	8,69	24,51	8,96
		Камерный	57,57	9,18	27,69	11,12	20,87	12,71	91,31	75,49	91,04
0	XI	Пенный	41,33	84,75	4,06	4,60	1,99	84,19	9,60	22,62	6,22
		Камерный	58,67	11,21	26,90	11,07	21,10	15,81	90,40	77,38	93,78
0	XII	Пенный	36,51	84,66	2,97	4,87	1,64	74,29	6,21	21,19	4,55
		Камерный	63,49	16,84	25,79	10,43	19,84	25,71	93,79	78,81	95,45
0	XIII	Пенный	23,45	89,55	2,85	6,65	1,53	50,48	3,82	18,56	2,73
		Камерный	76,55	26,91	21,94	8,81	16,77	49,52	96,18	81,44	97,27

Как видно, с увеличением оборотных циклов рассола при одинаковом расходе алкилморфолина в 460 г/т руды наблюдался рост выхода пенного продукта. При использовании первичного рассола было извлечено 89,55 % галита, а 10,45 % его осталось в камерном продукте, что соответствовало содержанию в 7,61 %. В циклах II и III использования данного рассола при этом же расходе наблюдалось увеличение извлечения галита в пенный продукт, что указывало на накопление собирателя в маточном растворе. Так, уже в цикле III извлечение галита возросло до 93,76 %, а содержание его в камерном продукте снизилось до 4,82 %, что является хорошим показателем для дальнейшей переработки данного камерного продукта на калийно-магниевые удобрения. Однако при этом с пенным продуктом на 2,6 % возросли потери (извлечение) калийсодержащих минералов.

Потери сульфатсодержащих минералов с увеличением цикла оборотного маточника также возросли. Если в цикле I они составляли 19,46 %, цикле II – 21,21 %, то уже в цикле III – 24,35 %. Прирост составил 4,89 %.

Хлорид магния входит в состав карналлита, поэтому потери этого минерала определяли по извлечению MgCl₂ в пенный продукт. С увеличением выхода пенного продукта извлечение хлорида магния возросло на 1,13 %, содержание его в камерном продукте также стало больше, но незначительно – около 1 %.

Следует отметить, что с увеличением расхода алкилморфолина и накоплением его в рассоле возросло и пенообразование, флотационная пена стала более высокой и стабильной. Повышенное пенообразование привело к механическому выносу всех составляющих руды в пенный продукт, в том числе и полезных компонентов – каинита и карналлита, о чем свидетельствовали повышенные показатели извлечения этих минералов.

Для того чтобы определиться с оптимальным расходом алкилморфолина на оборотных маточниках, начиная с цикла IV, начали снижать расход собирателя с шагом в 60 г/т руды.

В циклах IV и V использования оборотных рассолов при расходах алкилморфолина 400 и 340 г/т руды продолжал наблюдаться рост выхода пенного продукта. По сравнению с циклом III он составил 1,37 %, при этом извлечение галита в пенный продукт возросло до 94,23 %. Однако увеличились и потери калийсодержащих минералов на 1,71 %, сульфатсодержащих – на 4,03 % и карналлита – на 2,2 %.

При дальнейшем снижении расхода алкилморфолина до 280 г/т руды (цикл VI) выход пенного продукта уменьшился на 0,91 % по сравнению с предыдущим циклом V, а извлечение галита увеличилось до 95,26 %, содержание его в камерном продукте снизилось до 3,69 %. Это наилучший показатель по содержанию галита в камерном продукте, что объясняется наличием в маточнике еще достаточного количества алкилморфолина, необходимого для получения оптимальных технологических показателей флотации. Потери калийсодержащих минералов при этом уменьшились на 1,63 %, карналлита – на 1,33 %, а потери сульфатсодержащих минералов выросли на 1,07 %.

Начиная с расхода 220 г/т руды, наблюдалось незначительное снижение выхода пенного продукта на 0,3 % и снижение извлечения галита на 0,52 %, при этом содержание его в камерном

продукте возросло на 0,37 % и составило 4,06 %. Потери калийсодержащих и сульфатсодержащих минералов остались на прежнем уровне.

При расходе алкилморфолина 160 г/т руды (цикл VIII) и при 460 г/т (цикл III) выходы пенного и камерного продуктов совпадали. Сравнение технологических показателей флотации галита показало, что продукты имели достаточно близкие технологические показатели: в цикле VIII извлечение галита в пенный продукт на 0,81 % выше, а содержание его в камерном продукте на 0,63 % ниже и составило 4,19 %, что является хорошим показателем для дальнейшей переработки его на калийно-магниевые удобрения. Потери калийсодержащих минералов возросли на 0,51 %, сульфатсодержащих минералов – на 5,75 %, а карналлита – снизились на 0,35 %.

Начиная с расхода 100 г/т руды, с каждым последующим снижением расхода собирателя наблюдалось ухудшение технологических показателей флотации: уменьшение выхода пенного продукта из-за снижения извлечения в пенный продукт галита и других минералов. Все это являлось следствием недостатка собирателя галита – алкилморфолина.

О накоплении алкилморфолина также свидетельствуют опыты, проведенные без добавления реагента, позволявшие извлекать в пенный продукт галит. Особенно это видно на цикле XI, где извлечение галита было достаточно высоким и достигло 84,19 %.

Полное обновление маточника происходило за 15 циклов. Таким образом, алкилморфолин вследствие своей способности растворяться в рассоле имеет свойство накапливаться в оборотном маточнике, поэтому его первоначальный расход может быть снижен с 460 до 220–160 г/т руды, т. е. в 2–2,5 раза.

Заключение. Установлено, что флотореагент Armoflote 619 представляет собой двухкомпонентную смесь N-алкилированных морфолинов с нормальными насыщенными алифатическими цепями. Коллоидно-химические свойства Armoflote 619 в солевых растворах имеют высокую устойчивость к высаливающему действию, что позволяет значительно снижать его расход в оборотных маточниках. Показано, что использование подкисленных маточников (рН 3–4), обладающих сильным депрессирующим действием в отношении калий-магний-сульфатного компонента, приводит как к повышению извлечения галита в пенный продукт, так и к снижению потерь хлорида калия в 1,3 раза и сульфата магния в 2,8 раза при снижении расхода собирателя по сравнению с нейтральными маточными растворами. Определены оптимальные расходы собирателя галита в первичных и оборотных подкисленных маточниках. Для получения результатов высокого качества по извлечению галита в пенный продукт на первичном маточнике расход Armoflote 619 составил 460 г/т, а в оборотных маточниках расход собирателя снижался до 160 г/т. При этом камерный продукт содержал 4–5 % хлорида натрия в составе калий-магний-сульфатного компонента, что является оптимальным для дальнейшей переработки с целью получения сульфата калия.

Список использованных источников

1. Желнин, А. А. Теоретические основы и практика флотации калийных солей / А. А. Желнин. – Л. : Химия, 1973. – 184 с.
2. Shubert, H. Das Flotation von KCl und NaCl mit N-Alkylmorpholin und seine theoretische Deutung / H. Shubert, W. Hälbich // Bergakademie. – 1965. – В. 17, № 8. – С. 24–27.
3. Utilization of Ammonium Chloride as a Novel Selective Depressant in Reverse Flotation of Potassium Chloride / Runqing Liu, Hongyu Lu, Li Wang [et al.] // Minerals. – 2019. – Vol. 9, № 1. – P. 41.
4. Флотационное обогащение калийных руд / Л. В. Дихтиевская, Л. Ф. Шломина, Е. О. Осипова [и др.] // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя хімічных навук. – 2019. – Т. 55, № 3. – С. 277–287. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-3-277-287>
5. Pan B. Flotation of halite and sylvite from carnallite with dodecyl morpholine. – The University of Utah, 2013. – URL: <https://files01.core.ac.uk/download/pdf/276265333.pdf> (date of access: 18.11.2024).
6. Титков, С. Н. Активация действия катионных реагентов-собирателей / С. Н. Титков // Записки горного института. – 2005. – Т. 165. – С. 191–195.
7. Abu-Hamattah, Z. S. H. Carnallite Froth Flotation Optimization and Flotation Cells Efficiency in the Arab Potash Company, DEAD SEA, JORDAN / Z. S. H. Abu-Hamattah, A. M. Al-Amr // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 2008. – Vol. 29, № 3. – P. 232–257. <https://doi.org/10.1080/08827500801997894>.
8. Titkov, S. Investigations of alkylmorpholines – collectors for a new halite flotation process / S. Titkov, R. Sabirov, N. Panteleeva // Minerals engineering. – 2003. – Vol. 16, № 11. – С. 1161–1166.

9. Utilization of a new Gemini surfactant as the collector for the reverse froth flotation of phosphate ore in sustainable production of phosphate fertilizer / Z. Huang, C. Cheng, Z. Liu [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2019. – Vol. 221. – P. 108–112.
10. Evaluation of a novel morpholine-typed Gemini surfactant as the collector for the reverse flotation separation of halite from carnallite ore / Z. Huang, S. Zhang, F. Zhang [et al.] // *Journal of Molecular Liquids*. – 2020. – Vol. 313. – P. 113506.
11. Mehri, A. Flotation of potash for Carnallite resources in Khur playa of Iran using Jameson flotation cell / A. Mehri, M. Haghani, E. Mozaffari // *Journal of Environmental Analytical Chemistry*. – 2019. – Vol. 6, № 254. – P. 2.
12. Titkov, S. Halite Flotation – New Trands (New Purpose) / S. Titkov, R. Sabirov, N. Panteleeva, E. Alekseeva // XXIV International Mineral Processing Congress. – China, 2008. – Vol. 2. – P. 1688–1695.
13. Галургия: теория и практика / Е. А. Высоцкий, А. А. Желнин, А. Б. Здановский [и др.] ; под. ред. И. Д. Соколова. – Л. : Химия, 1983. – 368 с.

References

1. Zhelnin A. A. *Theoretical foundations and practice of flotation of potassium salts*. Leningrad, Khimiya Publ., 1973. 184 p. (in Russian).
2. Shubert H., Hälbig W. Das Flotation von KCl und NaCl mit N-Alkylmorpholin und seine theoretische Deutung. *Bergakademie*, 1965, b. 17, no. 8, pp. 24–27 (in German).
3. Runqing Liu, Hongyu Lu, Li Wang, Mengjie Tian, Wei Sun. Utilization of Ammonium Chloride as a Novel Selective Depressant in Reverse Flotation of Potassium Chloride. *Minerals*, 2019, vol. 9, no. 1, pp. 41. <https://doi.org/10.3390/min9010041>
4. Dikhtievskaya L. V., Shlomina L. F., Osipova E. O., Shevchuk V. V., Mozheyko F. F. Flotation enrichment of potash ores of different mineralogical composition. *Vestsi Natsyonal'nei akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2018, vol. 55, no. 3, pp. 277–287 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-3-277-287>
5. Pan B. *Flotation of halite and sylvite from carnallite with dodecyl morpholine*. The University of Utah, 2013. Available at: <https://files01.core.ac.uk/download/pdf/276265333.pdf> (accessed 18.11.2024).
6. Titkov S. N. Activation of the action of cationic reagents-gatherers. *Journal of Mining Institute*, 2005, vol. 165, pp. 191–195 (in Russian).
7. Abu-Hamatte Z. S. H., Al-Amr A. M. Carnallite Froth Flotation Optimization and Flotation Cells Efficiency in the Arab Potash Company, DEAD SEA, JORDAN. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2008, vol. 29, no. 3, pp. 232–257. <https://doi.org/10.1080/08827500801997894>
8. Titkov S., Sabirov R., Panteleeva N. Investigations of alkylmorpholines – collectors for a new halite flotation process. *Minerals engineering*, 2003, vol. 16, no. 11, pp. 1161–1166.
9. Huang Z., Cheng C., Liu Z., Zeng H., Feng B., Zhong H., Luo W., Hu Y., Guo Z., He G., Fu W. Utilization of a new Gemini surfactant as the collector for the reverse froth flotation of phosphate ore in sustainable production of phosphate fertilizer. *Journal of Cleaner Production*, 2019, vol. 221, pp. 108–112.
10. Huang Z., Zhang S., Zhang F., Wang H., Zhou J., Yu X., Liu R., Cheng C., Liu Z., Guo Z., He G., Ai G., Fu W. Evaluation of a novel morpholine-typed Gemini surfactant as the collector for the reverse flotation separation of halite from carnallite ore. *Journal of Molecular Liquids*, 2020, vol. 313, pp. 113506.
11. Mehri A., Haghani M., Mozaffari E. Flotation of potash for Carnallite resources in Khur playa of Iran using Jameson flotation cell. *Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2019, vol. 6, no. 254, pp. 2.
12. Titkov S., Sabirov R., Panteleeva N., Alekseeva E. *Halite Flotation – New Trands (New Purpose)*. XXIV International Mineral Processing Congress, China, 2008, vol. 2, pp. 1688–1695.
13. Vysotsky E. A., Zhelnin A. A., Zdanovsky A. B., Kashkarov O. D., Permyakov R. S., Sokolov I. D., Titkov S. N. *Galurgia: Theory and Practice*. Ed. I. D. Sokolov. Leningrad : Chemistry publ., 1983. 368 p. (in Russian).

Информация об авторах

Осипова Елена Олеговна – научный сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: osipovaelena81@gmail.com

Шевчук Вячеслав Владимирович – доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: shevchukslava@rambler.ru

Information about the authors

Osipova Elena O. – Research. 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: osipovaelena81@gmail.com

Shevchuk Vyacheslav V. – Dr. Sci. (Technical), Associate Professor, Head of the Laboratory. 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: shevchukslava@rambler.ru