

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФЛОТАЦИИ ТРУДНООБОГАТИМЫХ АПАТИТ-НЕФЕЛИНОВЫХ РУД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕЛЕКТИВНЫХ РЕАГЕНТОВ СОБИРАТЕЛЕЙ

И.В. Никитина¹, А.Е. Таран¹, Т.Н. Перункова¹, Г.В. Митрофанова¹

¹ Горный институт КНЦ РАН, Россия, e-mail: kokina.05@mail.ru

Аннотация: Вовлечение в переработку апатит-нефелиновых руд, характеризующихся низким суммарным количеством основных рудных минералов, сопровождается снижением технологических показателей получения апатитового концентрата. Один из способов решения проблемы — подбор оптимального реагентного режима. На примере четырех проб апатит-нефелиновой руды с низким содержанием основных минералов фторапатита и нефелина (сумма апатита и нефелина колеблется в диапазоне от 44—50%) изучены флотационные и пенообразующие свойства компонентов собирательной смеси — реагентов Phospholan PE-65 и Berol 511 (реагенты предоставлены фирмой Nouryon). Реагент Berol 511 относится к классу неионогенных собирателей и представляет собой гидроксикаламыды жирных кислот. Реагент Phospholan PE-65 — анионоактивный собиратель, представляющий собой смесь оксигетилированных алкиловых эфиров фосфорной кислоты. Показано, что добавка реагента Berol 511 к смеси жирнокислотных собирателей в количестве 10—30% приводит к повышению содержания P_2O_5 в концентрате, однако это сопровождается резким снижением пенообразования. Добавка Berol 511 свыше 10% приводит к росту циркуляционной нагрузки и снижению извлечения P_2O_5 . Установлено, что увеличение доли реагента Phospholan PE-65 выше 30% приводит к снижению активности собирательной смеси и уменьшению пенообразования, процесс идет неровно, возрастает циркуляционная нагрузка. Показана возможность получения из труднообогатимой и бедной апатит-нефелиновой руды апатитового концентрата с содержанием P_2O_5 не ниже 39% при использовании собирательной смеси оптимального состава.

Ключевые слова: труднообогатимые апатит-нефелиновые руды Кольского полуострова, флотация, реагенты-собиратели, таловые масла, Phospholan PE-65, Berol 511, селективность собирательной смеси, пенообразование.

Для цитирования: Никитина И. В., Таран А. Е., Перункова Т. Н., Митрофанова Г. В. Повышение эффективности флотации труднообогатимых апатит-нефелиновых руд с использованием селективных реагентов собирателей // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 11. – С. 95–108. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_0_95.

Stimulation of flotation of rebellious apatite–nepheline ore with selective collecting agents

I.V. Nikitina¹, A.E. Taran¹, T.N. Perunkova¹, G.V. Mitrofanova¹

¹ Mining Institute, Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences,
Apatity, Russia, e-mail: kokina.05@mail.ru

Abstract: Processing of apatite–nepheline ore having low total content of basic metallic minerals features reduced efficiency in production of apatite concentrate. One of the approaches to this problem is optimization of the reagent regime in flotation. Using four samples of apatite–nepheline ore with low content of basic minerals represented by fluor apatite and nepheline (the sum of apatite and nepheline fluctuates within the range of 44–50%), the flotation and foaming properties are studied in the mixture of collecting agents Phospholan PE-65 and Berol 511 (courtesy of Nouryon). Agent Berol 511 belongs in the class of nonionic collectors and represents hydroxyalkylamides of fat acids. Agent PE-65 is the anion active collector composed of mixed oxyethylated alkyl ether of phosphoric acid. Addition of Berol 511 in amount of 10–30% to the mixture of the fat acid collectors results in the higher content of P_2O_5 in concentrate but the foaming behavior drops at the same time. Addition of more than 10% of Berol 511 leads to an increase in the circulating load and to a decrease in recovery of P_2O_5 . The increase in the portion of Phospholan PE-65 above 30% decreases activity of the collecting mixture and reduces foam formation, induces nonuniformity of the process and elevates the circulating load. The study illustrates feasibility of producing apatite concentrate with the content of P_2O_5 not less than 39% from rebellious and low-grade apatite–nepheline ore using the optimized composition of the collecting mixture.

Key words: rebellious apatite–nepheline ore of the Kola Peninsula, flotation, collecting agents, tall oils, Phospholan PE-65, Berol 511, collecting mixture selectivity, foam formation.

For citation: Nikitina I. V., Taran A. E., Perunkova T. N., Mitrofanova G. V. Stimulation of flotation of rebellious apatite–nepheline ore with selective collecting agents. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(11):95-108. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_0_95.

Введение

В настоящее время в мире наблюдается устойчивая тенденция вовлечения в промышленное освоение руд, характеризующихся сложным вещественным составом и трудной обогатимостью [1, 2]. Изменение в руде количественного соотношения основных рудных минералов, наличие вторичных минералов обуславливает нарушение флотационного процесса с использованием традиционных собирателей [3]. Реальность такова, что существующие технологии и реагентные режимы не способны обеспечить требуемую эффективность переработки такого вида сырья.

Апатит-нефелиновые руды группы Хибинских месторождений являются главной сырьевой базой России для производства минеральных удобрений, ввиду чего проведены многочисленные гео-

химические и минералогические исследования различных природных типов апатит-нефелиновой руды [4–6]. Установлено, что наличие в руде глинистых и вторичных минералов, образованных под действием различных гидротермальных процессов оказывает значительное влияние на процесс флотационного обогащения [7]. Разрушение нефелина сопровождается выщелачиванием натрия и калия. Сфен, эгирин, титаномагнетит разрушаются с образованием коллоидных растворов. Из них выпадают и осаждаются на других минералах (в том числе и на апатите) гидроокислы железа [8]. Наличие в руде вторичных минералов типа монтмориллонита, натролита, цеолитов, способных выступать в качестве ионообменников, обуславливает изменение ионного состава жидкой фазы

флотационной пульпы [9, 10]. При измельчении такого типа руд наблюдаются повышенные, на уровне 10–10,3, значения pH суспензии руды, что требует корректировки расходов депрессора, собирателя и условий проведения флотации [11].

Один из способов решения проблемы получения качественного апатитового концентрата — подбор оптимального реагентного режима с учетом выявленных особенностей поведения собирателей, входящих в состав реагентной смеси. Ассортимент реагентов-собирателей для флотации апатитсодержащих руд достаточно широк [12]. Помимо традиционных жирных кислот [13] в него входят соединения с сульфонатной [14], фосфатной [15], гидроксаматной [16] и другими функциональными группами. Большое количество исследований посвящено изучению влияния вводимых в структуру собирателя группировок на его физические и коллекторные свойства [17, 18].

Традиционно используемые в качестве собирателя флотации апатита смеси таловых масел не обеспечивают необходимую селективность разделения минералов при обогащении сложных по минеральному составу руд. Это определяет необходимость введения в состав смеси высокоселективных собирателей. В данной работе в качестве составляющих компонентов собирательной смеси рассмотрены два реагента, выпускаемые фирмой AkzoNobel (ныне Nouryon) — Phospholan PE-65 и Berol 511. Использование таких реагентов при флотации сложных по минеральному составу апатит-нефелиновых руд позволит повысить селективность собирательной смеси.

Объекты и методы исследования

В настоящей работе проведена оценка флотационных свойств реагентов —

Phospholan PE-65 и Berol 511 в сочетании с талловыми маслами. Реагент Berol 511 относится к классу неионогенных собирателей и представляет собой гидроксикалиамиды жирных кислот. В то время как реагент Phospholan PE-65, представляющий собой смесь оксиэтилированных алкиловых моно- и диэфиров фосфорной кислоты, имеет в своей структуре кислотные группировки.

Исследования реагентов проводили на четырех отличающихся по своему составу пробах (АНР-0, АНР-1, АНР-2 и АНР-3) апатит-нефелиновой руды, отобранных с открытого карьера (АНР-0, АНР-1) и из подземного рудника месторождения «Олений ручей» (АНР-2 и АНР-3). Отличительной особенностью этого месторождения является сложная форма залежей с образованием многоярусных рудных зон, отличающихся по своим структурно-текстурным особенностям. Переменный состав, повышенное содержание пироксенов, в том числе эгирин-авгита с содержанием CaO около 14%, титанита, доля которого может составлять до 4–5% [24], высокое содержание слюд, наличие цеолитов, глинистых минералов обуславливают сложность обогащения руды этого месторождения.

Знание химического состава руды (табл. 1) не всегда достаточно для прогноза ее обогатимости. Традиционная оценка количества общего и кислото-растворимого Al_2O_3 как показателя содержания полевых шпатов и нефелина некорректна при описании руд из зон гипергенеза, так как вторичные по нефелину минералы также характеризуются $Al_2O_{3к/р}$. Одним из показателей видоизмененности руды является соотношение $Na_2O/K_2O < 1$, поскольку разрушение нефелина сопровождается выщелачиванием натрия. Для проб руды, использованных для исследования в настоящей работе, характерно соотноше-

Таблица 1

Химический состав проб апатит-нефелиновой руды
Chemical composition of apatite-nepheline ore (ANO) samples

Проба руды	Содержание, %							Na ₂ O/ K ₂ O	Na ₂ O/ Al ₂ O ₃ Зобщ.
	P ₂ O ₅	TiO ₂	Al ₂ O ₃ Зобщ.	Al ₂ O ₃ Зк/р	Fe _{общ.}	Na ₂ O	K ₂ O		
АНР-0	11,96	2,69	12,69	10,14	5,43	5,90	4,69	1,26	0,46
АНР-1	8,65	3,01	14,13	11,69	6,04	6,86	5,00	1,37	0,49
АНР-2	6,10	2,54	15,96	12,08	5,41	7,39	5,79	1,27	0,46
АНР-3	8,63	2,95	14,02	12,00	6,08	7,74	4,53	1,71	0,55

ние Na₂O/K₂O = 1,2 – 1,7 (табл. 1), что может говорить об отсутствии или малой степени видоизмененности. Однако глинистые минералы, содалит, канкринит, цеолиты, определяющие ионный состав жидкой фазы флотационной пуль-

Таблица 2

Минеральный состав проб апатит-нефелиновой руды
по данным рентгенофазового анализа
Mineral composition of apatite-nepheline ore (ANO) samples by X-ray phase analysis data

Минерал	Содержание, %			
	АНР-0	АНР-1	АНР-2	АНР-3
Фторапатит	28,22	21,82	14,98	21,19
Нефелин	21,36	25,47	29,99	23,54
Эгирин	2,47	2,48	3,44	4,27
Эгирин кальциевый (эгирин-авгит)	4,85	5,59	2,95	3,31
Амфиболы, всего	8,19	8,97	7,83	5,92
Полевые шпаты, всего	9,60	10,58	15,13	12,53
Титанит	4,04	4,59	2,69	2,91
Канкринит	1,46	1,61	2,27	1,45
Содалит	0,29	0,28	0,87	0,66
Ильменит	0,21	0,20	0,70	0,66
Магнетит титанистый	0,53	0,61	0,56	0,71
Лампрофиллит	1,27	1,41	1,01	0,91
Слюды, всего	13,89	13,42	14,51	19,15
в т.ч. гидрослюды	4,57	4,43	4,49	4,40
Хлориты	–	–	–	0,17
Гетит	0,16	–	–	–
Глинистые минералы, всего	0,42	–	–	–
Цеолиты (натролит, филлипсит), всего	3,05	2,97	3,07	2,62
Сумма	100	100	100	100

* Минеральный состав рассматриваемых проб руды определен вед. научн. сотр. Горного института КНЦ РАН к.т.н. В.В. Марчевской.

пы [9, 10], могут оказывать негативное влияние на процесс обогащения. Поэтому важной характеристикой при прогнозе обогатимости руды является ее минеральный состав.

Пробы, на которых проводили исследование, характеризует низкое содержание основных минералов (табл. 2) фторапатита и нефелина (сумма апатита и нефелина колеблется в диапазоне от 44–50%). Во всех пробах присутствуют цеолиты, наличие которых может привести к нарушению процесса флотации апатита. Наиболее богатая по P_2O_5 проба АНР-0 отличается наличием в ней гетита и глинистых минералов, что говорит о некоторой степени видоизмененности руды. Проба АНР-2 с содержанием P_2O_5 6,10% (табл. 1) представляет собой бедную руду. Пробы АНР-1 и АНР-3, характеризующиеся близким содержанием апатита и нефелина, отличаются содержанием эгирин-авгита и слюд. В пробе АНР-1 большее из всех проб содержание кальциевых минералов, сравнимых по своей флотационной способности апатиту — 5,59% эгирин-авгита и 4,59% титанита. В пробе АНР-3 высокое содержание слюд (19,15%), также нарушающих селективность апатитовой флотации. Из данных табл. 2 видно, что вторичные минералы представлены во всех пробах в основном продуктами превращения нефелина. Содержание гидрослюд во всех пробах отличается незначительно (от 4,40 до 4,57%) и не достигает значений, характерных для руды из зон гипергенеза (≥ 8 –10%). Содержание цеолитов во всех пробах также имеет сравнимые значения — от 2,62 до 3,07%.

Лабораторные флотационные опыты проводили на оборотной воде обогатительной фабрики АО «СЗФК» в замкнутом цикле с проведением основной (ОФ), контрольной (КФ) и двух перечистных (ПФ) флотаций. Содержание класса +0,16 мм в питании флотации

составило 24–26%. С помощью добавления необходимого количества едкого натра рН флотации поддерживали на уровне 9,7–9,8. В качестве депрессора темноцветных минералов использовали жидкое стекло (ЖСт), которое подавали в измельчение. Расход регулятора Неонол АФ 9-10 во всех опытах составил 10 г/т.

Результаты флотации оценивали по данным анализа продуктов флотации и основным технологическим параметрам процесса: усредненным показателям 5-й и 6-й навесок, %: содержание P_2O_5 в концентрате (β) и хвостах (θ), извлечение P_2O_5 в концентрат (ε) и по циркуляционной нагрузке. Также оценивали свойства флотационной пены по ее минерализации (M), коэффициентам пенообразования (K_n).

Циркуляционная нагрузка — отношение суммарного веса конечных пенного продукта КФ, камерных продуктов ПФ-1 и ПФ-2 к исходной навеске, %. M — отношение веса сухого пенного продукта к его мокрому весу, %. K_n — коэффициент пенообразования — отношение объема образованной пены пенного продукта флотации к сухому весу продукта, см³/г.

Результаты и обсуждение

Традиционными реагентами для флотации апатита являются талловые масла — дистиллированное (ДТМ), хвойное (ХТМ) и лиственное (ЛТМ). Однако изменение минерального состава вовлекаемых в переработку руд приводит к нарушению селективности процесса выделения апатита и требует использования более эффективных собирателей. В последнее время в качестве таких реагентов рассматривают реагенты Phospholan PE-65 и Berol 511 (фирма AkzoNobel, ныне Nouryon).

Реагент Phospholan PE-65, представляющий собой смесь оксиэтилирован-

ных эфиров фосфорной кислоты как монособиратель характеризуется более высокой селективностью действия по сравнению с жирными кислотами талловых масел. При использовании Phospholan PE-65 в качестве собирателя при флотации немагнитной фракции бадделеит-магнетит-апатитовой руды Ковдорского месторождения наблюдалось снижение выхода в концентрат магнийсодержащих силикатов, что обеспечило получение апатитового концентрата более высокого качества. Следует отметить, что и извлечение P_2O_5 в концентрат при использовании Phospholan PE-65 составило 83,7% по сравнению с 54,1% P_2O_5 в случае с ЖКТМ [19]. Низкая пенообразующая способность оксипропилированных алкилэфиров фосфорной кислоты позволила при введении этих реагентов в состав собирательной смеси получить удовлетворительные показатели по пене и снизить расход собирателя при флотации апатит-нефелиновой руды при пониженной температуре [20].

Реагент Berol 511 относится к классу неиногенных реагентов и представляет собой гидроксикаламида жирных кислот. Применение подобных соединений известно в практике обогащения апатитсодержащих руд. Моноалканоламида синтетических кислот использовались в качестве вспомогательного реагента

при флотации апатит-карбонатных руд Ковдорского месторождения, причем отмечалось их положительное влияние при флотации руд из зон выветривания [21]. Совместное применение алканоламида с дистиллированным талловым позволило получить из апатит-франколитовой руды Ковдорского месторождения концентрат с содержанием более 37% P_2O_5 в результате двух перечисток при удовлетворительном извлечении 79–84%. Отмечалось, что особенность влияния алканоламида на флотацию заключается в повышении скорости флотации апатита при отсутствии активирующего действия по отношению к сопутствующим минералам руды [22]. Алканоламида синтетических кислот были предложены и опробованы в ходе промышленных испытаний взамен реагента ОП-4 при флотации апатит-нефелиновых руд Хибинских месторождений. Показана эффективность их использования в условиях водооборота при флотации на оборотной воде с повышенным содержанием взвешенных веществ [23].

Анализ имеющихся данных по использованию реагента Phospholan PE-65 и соединений, подобных Berol 511, при флотации апатитсодержащих руд показал, что наиболее целесообразно рассматривать эти реагенты в качестве добавок к собирательной смеси, состоящей из талловых масел (СС).

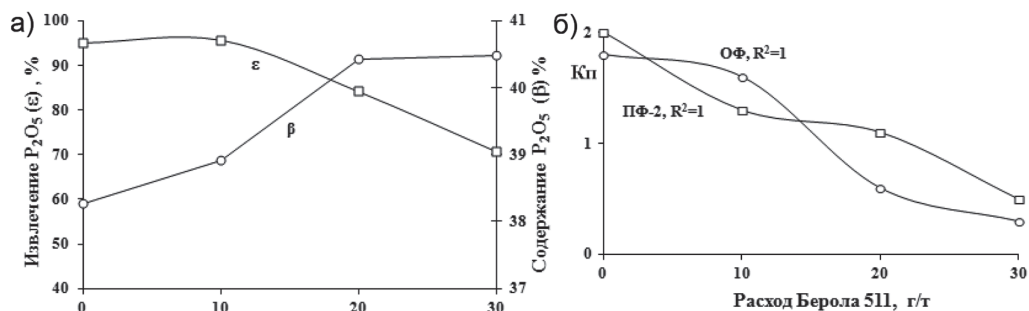


Рис. 1. Влияние добавок Berol 511 на показатели флотации пробы АНР-1; расход СС – 100 г/т

Fig. 1. Effect of Berol 511 addition on flotation of ANO sample 1; collecting mixture (CM) consumption 100 g/t

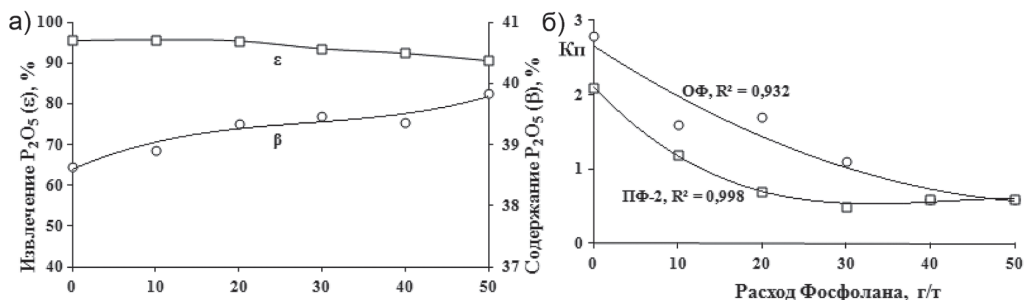


Рис. 2. Влияние добавок Phospholan PE-65 на показатели флотации пробы АНР-1; расход СС – 100 г/т
Fig. 2. Effect of Phospholan PE-65 addition on flotation of ANO sample 1; CM consumption 100 g/t

Зависимость показателей флотации от количества добавленных к собирательной смеси (СС) реагентов Berol 511 и Phospholan PE-65 показана на примере флотации пробы АНР-1 (рис. 1 и 2).

Из анализа данных рис. 1 видно, что добавка Berol 511 к смеси жирнокислотных собирателей приводит к снижению пенообразования как в основной флотации, так и в перечистных операциях, селективность собирателя растет. При добавке реагента Berol 511 до 10% масс. к смеси жирнокислотных собирателей содержание P_2O_5 в концентрате увеличивается при сохранении извлечения. Однако увеличение количества

добавки выше 10% приводит к росту циркуляционной нагрузки и снижению извлечения P_2O_5 , процесс флотации нарушается.

Из данных рис. 2 следует, что добавки Phospholan PE-65 в количестве до 20% к смеси жирнокислотных собирателей СС способствуют повышению содержания P_2O_5 в концентрате с 38,7 до 39,5% при равном извлечении. Увеличение содержания добавки Phospholan PE-65 выше 20% повышает (дополнительно) чистоту концентрата при небольшом снижении извлечения. Однако имеет место резкое снижение пенообразования как в ОФ, так и в перечистках, что явилось причи-

Таблица 3

Влияние добавок Berol 511 на флотацию пробы руды АНР-0 ($\alpha_{сп.} = 11,90\% P_2O_5$)
Effect of Berol 511 addition on flotation of ANO sample 0 ($\alpha_{ав.} = 11,90\% P_2O_5$)

Добавка Berol 511, %	Технологические показатели, % P_2O_5			Циркул. нагрузка, %	Пена ОФ		Пена ПФ-2	
	β	ε	θ		М, %	Кп	М, %	Кп
Расход СС – 120 г/т								
–	39,36	94,1	1,03	28,1	45,8	3,5	41,2	2,5
20	39,86	94,0	0,99	20,7	48,7	2,2	48,2	0,7
30*	40,35	80,7	0,74	40,5	65,8	1,8	50,8	0,7
Расход СС – 130 г/т								
–	38,35	95,9	0,70	23,7	41,5	4,4	39,6	2,6
10	38,50	96,3	0,65	16,4	40,0	3,9	42,5	2,2
20	38,59	93,8	1,05	21,6	45,2	2,9	47,1	0,7
30*	40,18	88,8	2,11	46,4	68,9	1,4	51,6	0,7

* – опыт не замкнулся

ной неустойчивости процесса при добавке 30–50% Phospholan PE-65 и снижения извлечения P_2O_5 в концентрат.

Особенности флотационного поведения исследуемых реагентов были подтверждены при флотации проб руды АНР-0, АНР-2 и АНР-3 (табл. 3–5).

На примере флотации пробы руды АНР-0, характеризующейся наличием вторично измененных минералов, показано (табл. 3), что при флотации добавка реагента Verol 511 к собирательной смеси в количестве до 10–20% также способствует росту содержания P_2O_5 в концентрате при примерном сохранении извлечения. Однако увеличение количества реагента Verol 511, добавляемого к смеси талловых масел (СС), более 20% приводит к значительному уменьшению извлечения P_2O_5 в концентрат на фоне снижения пенообразования и разрушаемости пены (табл. 3). При добавке к смеси 30% реагента Verol 511 опыты «не замкнулись», т.е. течение процесса было нестабильно и неравно-

мерно. Высокая минерализация пены в основной флотации на уровне 65,8–68,9% и до 50,8–51,6% в перечистных операциях привела к высоким циркуляционным нагрузкам. Подобные результаты были получены и на других пробах руды.

Показатели флотации, отражающие влияние добавок реагента Phospholan PE-65 на процесс, представлены в табл. 4 и 5. На примерах проб АНР-2 и АНР-3 показано, что увеличение доли реагента Phospholan PE-65 приводит к снижению активности собирательной смеси и уменьшению пенообразования. При добавке выше 30% возрастает циркуляционная нагрузка. При этом следует отметить, что увеличение доли Phospholan PE-65 обеспечивает усиление селективности действия собирателя. Для бедной руды (проба АНР-2) лучшие показатели по качеству апатитового концентрата – содержание 38,1% P_2O_5 при извлечении 91,4% получены при высокой доли этого реагента – 36%. Но ка-

Таблица 4

Результаты флотации пробы руды АНР-2 ($\alpha_{cp.} = 6,10\% P_2O_5$)
Flotation of ANO sample 2 ($\alpha_{av} = 6,10\% P_2O_5$)

Расход собирательной смеси, г/т	Технологические показатели, % P_2O_5			Циркул. нагрузка, %	Пена ОФ		Пена ПФ-2	
	β	ε	θ		М, %	Кп	М, %	Кп
СС								
100	34,54	93,0	0,50	15,0	35,8	4,0	37,0	3,0
80	36,69	85,4	1,05	13,5	36,4	3,7	35,1	2,9
80% СС + 20% Phospholan PE-65								
90	35,71	93,8	0,46	10,3	38,4	3,2	34,3	2,6
70	37,30	91,6	0,59	9,9	41,4	2,3	37,8	2,3
72% СС + 28% Phospholan PE-65								
70	37,00	92,5	0,54	9,6	41,6	1,3	41,7	1,3
50	38,38	79,9	1,47	9,4	36,8	2,2	38,0	2,0
64% СС + 36% Phospholan PE-65								
120	38,61	91,4	0,60	21,1	52,1	1,1	52,1	0,6
100	38,27	89,9	0,66	18,1	56,2	1,0	48,9	0,5

Таблица 5

Результаты флотации пробы руды АНР-3 ($\alpha_{cp.} = 8,60\% P_2O_5$)
Flotation of ANO sample 2 ($\alpha_{av} = 8,60\% P_2O_5$)

Расход собирательной смеси, г/т	Технологические показатели, % P_2O_5			Циркул. нагрузка %	Пена ОФ		Пена ПФ-2	
	β	ε	θ		М, %	Кп	М, %	Кп
83,3% СС + 16,7% Phospholan PE-65								
108	36,95	91,9	0,89	9,6	44,5	1,9	40,0	2,0
60*	38,65	88,7	1,10	15,6	45,5	2,2	37,0	2,6
77% СС + 23% Phospholan PE-65								
100	37,00	95,8	0,46	12,6	46,7	2,1	39,6	1,5
80	37,76	93,1	0,77	11,6	45,2	1,3	38,3	1,6
65	39,03	93,1	0,73	10,4	49,8	1,3	42,2	1,5
70% СС + 30% Phospholan PE-65								
90	39,23	91,8	0,95	17,6	55,6	1,0	43,9	0,8
* — опыт не замкнулся								

чественный апатитовый концентрат на пробе бедной апатит-нефелиновой руды АНР-2 получить не удалось (табл. 4). Снижение расхода собирательной смеси привело только к уменьшению выхода концентрата.

При флотации пробы руды АНР-3 с высоким содержанием слюд (19,15%) оптимальное количество реагента Phospholan PE-65 в собирательной смеси составило 23—30%. Добавка 23% этого реагента позволила при расходе собирательной смеси 65 г/т получить апатитовый концентрат с содержанием 39,03% и извлечением 93,1% (табл. 5). Увеличение доли Phospholan PE-65 в смеси до 30% привело к снижению активности, и для получения апатитового концентрата 39,23% P_2O_5 потребовался больший расход собирателя — 90 г/т. При увеличении доли Phospholan PE-65 в смеси уменьшается пенообразование, растет минерализация пены до 55,6% в основной флотации, что приводит к росту циркуляционной нагрузки.

Как показали результаты в табл. 4, жирнокислотная составляющая соби-

рательной смеси, состоящая из дистиллированного, хвойного и лиственного таловых масел, не позволяет даже при высокой доли селективного реагента Phospholan PE-65 получить апатитовый концентрат необходимого качества. Усиление селективности смеси за счет увеличения доли Phospholan PE-65 нецелесообразно, т.к. в этом случае пенообразование снизится еще больше, что будет затруднять ведение процесса флотации. Поэтому на пробе бедной руды АНР-2 в качестве жирнокислотной составляющей были опробованы дистиллированное талловое масло (ДТМ) и жирные кислоты таллового масла (ЖКТМ), характеризующиеся более высокой селективностью действия. Сочетание этих реагентов с Phospholan PE-65 обеспечило необходимую селективность и позволило получить из бедной апатит-нефелиновой руды качественные апатитовые концентраты (табл. 6). При расходе 70 г/т смеси 80% ЖКТМ и 20% Phospholan PE-65 был получен концентрат с содержанием 39,25% при извлечении 86,7%. Увеличение доли Phospho-

Таблица 6

Результаты флотации пробы руды АНР-2 ($\alpha_{cp.} = 6,08\% P_2O_5$) с использованием ЖКТМ и ДТМ

Flotation of ANO sample 2 ($\alpha_{av} = 6.08\% P_2O_5$) with DTO and FATO [DTO—distilled tall oil; FATO—fat acids of tall oil]

Расход реагентов, г/т		Технологические показатели, %			Циркул. нагрузка, %	Пена ОФ		Пена ПФ-2	
неонол	собирательная смесь	P_2O_5				М, %	Кп	М, %	Кп
		β	ε	θ					
83,3 % ЖКТМ + 16,7 % Phospholan PE-65									
15	70	38,74	91,4	0,60	34,4	59,0	2,0	39,7	0,8
80 % ЖКТМ + 20 % Phospholan PE-65									
15	70	39,25	86,7	0,83	26,0	62,3	0,8	37,3	0,8
70 % ЖКТМ + 30 % Phospholan PE-65									
7	60	39,62	87,8	0,78	26,8	62,4	1,0	44,6	0,8
10	80	38,73	91,8	0,55	30,5	59,2	1,8	43,0	0,7
70 % ДТМ + 30 % Phospholan PE-65									
10	80	39,30	91,8	0,56	28,8	62,7	1,2	45,9	0,8

lan PE-65 позволило повысить извлечение P_2O_5 . При расходе 65 г/т получен концентрат с содержанием 39,2% P_2O_5 при извлечении 87,8%. Для ДТМ оптимальное количество добавляемого Phospholan PE-65 составило 30%. При расходе такой смеси 80 г/т получен концентрат с содержанием 39,3% при извлечении 9,8%.

Таким образом, можно сказать, что при введении в состав собирательной смеси реагента Berol 511 наблюдается увеличение селективности действия, но оптимальное количество этого компонента ограничивается 10%. Более высокое содержание Berol 511 снижает активность собирателя, что приводит к снижению выхода концентрата.

Введение реагента Phospholan PE-65 в состав собирательной смеси обеспечивает необходимую для получения качественного апатитового концентрата селективность собирателя. Оптимальное количество Phospholan PE-65 может варьироваться для различных типов руд от 20 до 36%. Увеличение доли Phospholan PE-65 повышает селективность собира-

теля, но приводит к уменьшению пенообразующей способности.

Выводы

Проведена оценка флотационных свойств реагентов Berol 511 и Phospholan PE-65 при флотации апатита из труднообогатимых и бедных апатит-нефелиновых руд. Показано, что введение в состав собирательной смеси этих реагентов приводит к повышению селективности действия собирателя, но сопровождается снижением пенообразующей способности. Рекомендуемое количество Berol 511 до 10% масс., повышение доли этого реагента в смеси приводит к уменьшению выхода концентрата. Увеличение доли реагента Phospholan PE-65 приводит к увеличению как извлечения, так и качества P_2O_5 в концентрате. Подбор оптимального соотношения состава собирательной смеси (от 20 до 36% Phospholan PE-65) обеспечил получение качественных апатитовых концентратов из всех рассматриваемых проб апатит-нефелиновой руды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чантурия В. А., Вайсберг Л. А., Козлов А. П. Приоритетные исследования в области переработки минерального сырья // Обогащение руд. — 2014. — № 2. — С. 3–9.
2. Олейник Т. А., Скляр Л. В., Олейник М. О., Кушнирук Н. В. Особенности флотации апатита из руды месторождения Gare Aghaj // Обогащение полезных ископаемых. — 2018. — № 71 (112). — С. 69–80.
3. Мухина Т. Н., Марчевская В. В., Калугин А. И. Совершенствование технологии флотационного извлечения апатита из апатит-нефелиновых руд Хибинского массива // Горный журнал. — 2020. — № 5. — С. 34–39.
4. Дудкин О. Б. О механизме образования пленок и примазок на хибинском апатите в условиях гипергенеза // Записки Всесоюзного минералогического общества. — 1960. — Ч. 89. — Вып. 5. — С. 572–576.
5. Дорфман М. Д. Минералогия пегматитов и зон выветривания в ийолит-уртитях горы Юкспор Хибинского массива. — М.-Л.: Изд-во Академии наук СССР, 1962. — 168 с.
6. Новые Хибинские апатитовые месторождения / Под ред. Е. А. Каменева, Д. А. Минеева. — М.: Недра, 1982. — 182 с.
7. Корнеева У. В., Марчевская В. В. Проблемы обогащения апатит-нефелиновых руд хибинских месторождений / Будущее Арктики начинается здесь. Сборник материалов II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. — Апатиты, 2018. — С. 53–62.
8. Барский Л. А., Зиновьев Ю. З., Каменева Е. Е. Исследование флотационных свойств морфологических разновидностей апатито-нефелиновых руд Хибинских месторождений / Переработка окисленных руд. — М.: Наука, 1985. — С. 211–216.
9. Пеков И. В., Турчкова А. Г., Ловская Е. В., Чуканов Н. В. Цеолиты щелочных массивов. — М.: Эксмо, 2004. — 168 с.
10. Попов В. Г., Абдрахманов Р. Ф. Введение в обменно-адсорбционную концепцию формирования подземных вод: структура и ионообменные свойства глинистых минералов, кинетика процессов // Геологический сборник. — 2014. — № 11. — С. 233–242.
11. Elbendary A., Aleksandrova T., Nikolaeva N. Influence of operating parameters on the flotation of the Khibiny Apatite-Nepheline Deposits // Journal of Materials Research and Technology. 2019, vol. 8, no. 6, pp. 5080–5090.
12. Sis H., Chander S. Reagents used in flotation of phosphate ores, a critical review // Minerals Engineering, 2003, vol. 16, pp. 577–585.
13. Cao Q. B., Cheng J. H., Wen S. M., Li C. X., Bai S. J., Liu D. A mixed collector system for phosphate flotation // Minerals Engineering. 2015, vol. 78, pp. 114–121.
14. Черноусенко Е. В., Перункова Т. Н., Артемьев А. В., Митрофанова Г. В. Совершенствование технологий флотационного обогащения руд Кольского полуострова // Горный журнал. — 2020. — № 9. — С. 66–72.
15. Лавриненко А. А., Шрадер Э. А., Харчиков А. Н., Кунилова И. В. Оценка селективности флотации апатита из комплексной руды / Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки минерального сырья (Плаксинские чтения 2013). Материалы Международного совещания. — Томск, 2013. — С. 366–372.
16. Clapperton A., Bazin C., Downey D., Marois J.-S. Production of a phosphate concentrate from the tailings of a niobium ore concentrator // Minerals. 2020, vol. 10, no. 8, pp. 692. DOI: 10.3390/min10080692.
17. Митрофанова Г. В., Иванова В. А. Поверхностно-активные свойства моноалкил-производных янтарной кислоты // Журнал прикладной химии. — 2011. — Т. 84. — № 3. — С. 369–375.
18. Karlkvist T., Patra A., Kota H. R., Bordes R. Flotation selectivity of novel alkyl dicarboxylate reagents for apatite-calcite separation // Journal of Colloid and Interface Science. 2015, vol. 445, pp. 40–47.

19. Лавриненко А. А., Шрадер Э. А., Харчиков А. Н., Кунилова И. В. Флотуемость апатита из бадделейт-апатит-магнетитовой руды // ФТПРПИ. — 2013. — № 5. — С. 157–165.

20. Кострова М. А., Брыляков Ю. Е., Шишкин С. П., Клинберг А., Горловский С. И. Разработка реагентных режимов флотации апатита в холодной пульпе / Горное дело в Арктике. Труды 8-го Международного симпозиума. — Томск, 2005. — С. 282–283.

21. Алейников Н. А., Шахматова Н. Ю., Маслова Н. Е., Каупинен М. В. Обогащение фосфатных руд коры выветривания / Комплексное обогащение фосфорсодержащих руд. — Апатиты, 1978. — С. 88–98.

22. Алейников Н. А., Иванова В. А. Синтез и применение новых флотационных реагентов при обогащении руд / Обогащение руд и проблема безотходной технологии. — Л.: Наука, 1980. — С. 163–183.

23. Алейников Н. А., Гребнев А. Н., Кайтмазова Т. И., Макаров А. М. Флотация апатито-нефелиновой руды на оборотных водах с моноэтаноламидами синтетических карбоновых кислот // Обогащение руд. — 1982. — № 1. — С. 14–16.

24. Гершенкоп А. Ш., Мухина Т. Н., Артемьев А. В. Особенности минерального состава апатит-нефелиновых руд месторождения «Олений Ручей» и их влияние на показатели обогащения // Обогащение руд. — 2014. — № 3. — С. 33–35. **ИДБ**

REFERENCES

1. Chanturiya V. A., Vaisberg L. A., Kozlov A. P. Top-priority areas of research into mineral processing. *Obogashchenie rud*. 2014, no. 2, pp. 3–9. [In Russ].

2. Oleinik T. A., Sklyar L. V., Oleinik M. O., Kushniruk N. V. Features of apatite flotation from Gare Aghaj ore. *Obogashchenie poleznykh iskopaemykh*. 2018, no. 71 (112), pp. 69–80. [In Russ].

3. Mukhina T. N., Marchevskaya V. V., Kalugin A. I. Improvement of flotation technology for apatite recovery from apatite–nepheline ore of the Khibiny Massif. *Gornyi Zhurnal*. 2020, no. 5, pp. 34–39. [In Russ].

4. Dudkin O. B. Mechanism of film and leather coat formation on Khibiny apatite under conditions of hypergenesis. *Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva*. 1960, part 89, no. 5, pp. 572–576. [In Russ].

5. Dorfman M. D. *Mineralogiya pegmatitov i zon vyvetrivaniya v iiolit-urtitakh gory Yukspor Khibinskogo massiva* [Mineralogy of pegmatite and weathering zones in ijolite–urtite regions of the Yukspor Mountain in the Khibiny Massif], Moscow-Leningrad, Izd-vo Akademii nauk SSSR, 1962, 168 p.

6. *Novye Khibinskie apatitovye mestorozhdeniya*. Pod red. E. A. Kameneva, D. A. Mineeva D. A. [New apatite deposits in Khibiny. Kamenev E. A., Mineev D. A. (Eds.)], Moscow, Nedra, 1982, 182 p.

7. Korneeva U. V., Marchevskaya V. V. Processing problems of apatite–nepheline ore from Khibiny. *Budushchee Arktiki nachinaetsya zdes'. Sbornik materialov II Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [The Future of the Arctic Starts Here. Proceedings of II All-Russian Conference with Foreign Participation], Apatity, 2018, pp. 53–62. [In Russ].

8. Barskiy L. A., Zinov'ev Yu. Z., Kameneva E. E. Analysis of flotation properties of morphological varieties in apatite–nepheline ore in the Khibiny deposits. *Pererabotka okislennykh rud* [Oxidized ore processing], Moscow, Nauka, 1985, pp. 211–216.

9. Pekov I. V., Turchkova A. G., Lovskaya E. V., Chukanov N. V. *Tseolity shchelochnykh massivov* [Zeolite in alkaline rock masses], Moscow, Eksmo, 2004, 168 p.

10. Popov V. G., Abdrakhmanov R. F. The introduction into exchange and adsorption concept of ground water origination: Structure and ion-exchange properties of clay materials, process flow kinetics. *Geologicheskii sbornik*. 2014, no. 11, pp. 233–242. [In Russ].

11. Elbendary A., Aleksandrova T., Nikolaeva N. Influence of operating parameters on the flotation of the Khibiny Apatite-Nepheline Deposits. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019, vol. 8, no. 6, pp. 5080 – 5090.
12. Sis H., Chander S. Reagents used in flotation of phosphate ores, a critical review. *Minerals Engineering*, 2003, vol. 16, pp. 577 – 585.
13. Cao Q. B., Cheng J. H., Wen S. M., Li C. X., Bai S. J., Liu D. A mixed collector system for phosphate flotation. *Minerals Engineering*. 2015, vol. 78, pp. 114–121.
14. Chernousenko E. V., Perunkova T. N., Artem'ev A. V., Mitrofanova G. V. Improvement of flotation technology for ore of the Kola Peninsula. *Gornyi Zhurnal*. 2020, no. 9, pp. 66 – 72. [In Russ].
15. Lavrinenko A. A., Shrader E. A., Kharchikov A. N., Kunilova I. V. Selectivity assessment of apatite flotation from complex ore. *Innovatsionnye protsessy kompleksnoi i glubokoi pererabotki mineral'nogo syr'ya (Plaksinskie chteniya 2013). Materialy Mezhdunarodnogo soveshchaniya* [Innovations in Integrated Processing and Deeper Conversion of Mineral Raw Materials. Plaksin's Lectures 2013 – International Conference Proceedings], Tomsk, 2013, pp. 366 – 372. [In Russ].
16. Clapperton A., Bazin C., Downey D., Marois J.-S. Production of a phosphate concentrate from the tailings of a niobium ore concentrator. *Minerals*. 2020, vol. 10, no. 8, pp. 692. DOI: 10.3390/min10080692.
17. Mitrofanova G. V., Ivanova V. A. Surface active properties of monoalkyl derivatives of amber acid. *Zhurnal prikladnoy khimii*. 2011, vol. 84, no. 3, pp. 369 – 375. [In Russ].
18. Karlkvist T., Patra A., Kota H. R., Bordes R. Flotation selectivity of novel alkyl dicarboxylate reagents for apatite-calcite separation. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2015, vol. 445, pp. 40 – 47.
19. Lavrinenko A. A., Shrader E. A., Kharchikov A. N., Kunilova I. V. Floatability of apatite from baddeleyite-apatite-magnetite ore. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2013, no. 5, pp. 157 – 165. [In Russ].
20. Kostrova M. A., Brylyakov Yu.E., Shishkin S. P., Klinberg A., Gorlovskiy S. I. Design of reagent regimes for apatite flotation in cold pulp. *Gornoe delo v Arktike, Trudy 8-go Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Mining in the Arctic. Proceedings of the 8th International Symposium], Tomsk, 2005, pp. 282 – 283.
21. Aleinikov N. A., Shakhmatova N. Yu., Maslova N. E., Kaupinen M. V. Processing of phosphate ore from weathered layer. *Kompleksnoe obogashchenie fosforsoderzhashchikh rud* [Integrated Processing of Phosphorus-Bearing Ore], Apatity, 1978, pp. 88 – 98.
22. Aleynikov N. A., Ivanova V. A. Synthesis and application of new flotation agents in ore processing. *Obogashchenie rud i problema bezotkhodnoi tekhnologii* [Ore Processing and Non-Waste Technology Problem], Leningrad, Nauka, 1980, pp. 163 – 183.
23. Aleynikov N. A., Grebnev A. N., Kaymazova T. I., Makarov A. M. Flotation of apatite-nepheline ore in return water with monoethanolamides of synthetic carboxylic acids. *Obogashchenie rud*. 1982, no. 1, pp. 14 – 16. [In Russ].
24. Gershenkop A. Sh., Mukhina T. N., Artem'ev A. V. Features of mineral composition of apatite-nepheline ore from the Oleny Ruchei deposit and the impact on the ore processing efficiency. *Obogashchenie rud*. 2014, no. 3, pp. 33 – 35. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Никитина Ирина Валерьевна¹ – технолог 1 кат.,
 e-mail: kokina.05@mail.ru,
 Таран Анастасия Емельяновна¹ – технолог 1 кат.,
 e-mail: ivanovava@goi.kolasc.net.ru,
 Перункова Татьяна Николаевна¹ – ведущий технолог,
 e-mail: tatjana-perunkova@rambler.ru,

Митрофанова Галина Викторовна¹ — канд. техн. наук, доцент,
e-mail: gera@goi.kolasc.net.ru,
¹ Горный институт КНЦ РАН.
Для контактов: Никитина И.В., e-mail: kokina.05@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

I.V. Nikitina¹, Technologist of the 1st category,
e-mail: kokina.05@mail.ru,

A.E. Taran¹, Technologist of the 1st category,
e-mail: ivanovava@goi.kolasc.net.ru,

T.N. Perunkova¹, Leading Technologist,
e-mail: tatjana-perunkova@rambler.ru,

G.V. Mitrofanova¹, Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor, e-mail: gera@goi.kolasc.net.ru,

¹ Mining Institute, Kola Scientific Centre
of Russian Academy of Sciences, 184209, Apatity, Russia.

Corresponding author: I.V. Nikitina, e-mail: kokina.05@mail.ru.

Получена редакцией 04.03.2021; получена после рецензии 24.05.2021; принята к печати 10.10.2021.

Received by the editors 04.03.2021; received after the review 24.05.2021; accepted for printing 10.10.2021.



НОВИНКИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ГОРНАЯ КНИГА»



Черных Н.Г., Мельник В.В., Мирошник А.И.
**Научно-методическое обоснование и реализация
системного подхода к повышению технического уровня
подготовки запасов шахтных полей**

Год: 2021

Страниц: 200

ISBN: 978-5-98672-529-1

UDK: 550.41+551.24+513.061

Сформулирована концепция и обоснованы принципы обеспечения технологической и организационной устойчивости проведения подготовительных выработок, завершившиеся созданием проходческих и проходческо-очистных агрегатов нового типа. Приведены описания конструкций, результаты исследований и промышленных испытаний разработанных на базе существующей горно-проходческой и очистной техники проходческих комплексов. Предложен новый критерий — функциональный показатель качества (ФПК) горной машины, позволяющий установить соответствие создаваемой машины горной среде, проведена оценка качества проходческих комбайнов, комплексов и агрегатов по функциональному критерию, ФПК и уровню необходимого обеспечения проведения выработок.