

ПРИМЕНЕНИЕ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ РАЗНОПЛОТНЫХ МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ В КАЧЕСТВЕ СРЕДЫ РАЗДЕЛЕНИЯ ПРИ МАГНИТОЖИДКОСТНОЙ СЕПАРАЦИИ

© 2017 г. **В.С. Евдокимов, С.И. Евдокимов**

ООО «Научно-производственное предприятие ГЕОС» (ООО «НПП ГЕОС»), г. Владикавказ

Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет) (СКГМИ (ГТУ)), г. Владикавказ

Статья поступила в редакцию 24.03.16 г., доработана 14.05.16 г., подписана в печать 20.05.16 г.

Приведены результаты исследования нового способа магнитожидкостной сепарации, который отличается от известных наличием бислойной среды разделения в виде несмешивающихся ферромагнитных жидкостей разной плотности. При сепарации в бислойной среде разделения условие равновесия частицы на плоской поверхности, записанное согласно закону Юнга и правилу Неймана, должно быть дополнено линейным натяжением искривленной межфазной поверхности. Линейное натяжение является силовым и энергетическим барьером, препятствующим закреплению мелких частиц благородных металлов на межфазной границе, и причиной их эффективного извлечения в тяжелую фракцию. Способ магнитожидкостной сепарации испытан на концентратах, содержащих платиноиды. Установлено, что при сепарации в бислойной среде извлечение платиноидов в тяжелую фракцию составляет 25,89 %, а в ферромагнитной жидкости на основе воды – 19,73 %. Качество тяжелой фракции позволяет направить ее на гидрометаллургический передел, минуя медный завод, что повышает извлечение драгметаллов на 5,0 абс. %.

Ключевые слова: гравитационный концентрат, магнитожидкостная сепарация, несмешивающиеся ферромагнитные жидкости разной плотности, металлы платиновой группы.

Евдокимов В.С. – мл. науч. сотрудник ООО «НПП ГЕОС» (362035, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Леваневского, 253). E-mail: 19-Vadik-93@mail.ru.

Евдокимов С.И. – канд. техн. наук, доцент кафедры обогащения полезных ископаемых СКГМИ (362021, Россия, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44, кор. 10). E-mail: eva-ser@mail.ru.

Для цитирования: Евдокимов В.С., Евдокимов С.И. Применение несмешивающихся разноплотных магнитных жидкостей в качестве среды разделения при магнитожидкостной сепарации // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2017. No. 2. С. 4–12. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-2-4-12.

Evdokimov V.S., Evdokimov S.I.

Using immiscible magnetic liquids of different density as a separating medium for magnetic liquid separation

The article presents the results of a new magnetic liquid separation method study. This method differs from known methods by the presence of a bilayer separation medium in the form of immiscible ferromagnetic liquids of different density. When separating in a bilayer separation medium, the particle equilibrium condition on a plane surface, recorded according to Young's law and Neumann's rule, must be supplemented by the linear tension of a curved phase interface. A linear tension is a force and energy barrier that prevents fixing of fine particles of noble metals at the phase interface, and is the reason for their effective extraction into the heavy fraction. The magnetic liquid separation method was tested on concentrates containing platinoids. It was established that during separation in a bilayer medium, the extraction of platinoids into the heavy fraction was 25,89 %, and during separation in a water-based ferromagnetic fluid it was 19,73 %. The quality of the heavy fraction makes it possible to direct it to the hydrometallurgical process, bypassing the copper plant, which increases the extraction of precious metals by 5,0 % abs.

Keywords: gravity concentrate, magnetic liquid separation, immiscible ferromagnetic liquids of different density, platinum group metals.

Evdokimov V.S. – Junior research, LTD «NPP GEOS» (Russia, Republic of North Osetia-Alania, Vladikavkaz, Levanevskogo str., 253). E-mail: 19-Vadik-93@mail.ru.

Evdokimov S.I. – Cand. Sci. (Eng.), Associate professor, Department of mineral processing of North-Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State University of Technology) (362021, Russia, Vladikavkaz, Nikolaeva str., 44, Build. 10). E-mail: eva-ser@mail.ru.

Citation: Evdokimov V.S., Evdokimov S.I. Primenenie nesmeshivayushchikhsya raznoplottykh magnitnykh zhidkosti v kachestve sredy razdeleniya pri magnitozhidkostnoi separatsii. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2017. No. 2. P. 4–12. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-2-4-12.

Введение

Минерально-сырьевая база РФ металлов платиновой группы (МПГ) состоит преимущественно из запасов платиноидов в сульфидных медно-никелевых месторождениях Таймырского региона (~66 %) [1, 2]. Формы нахождения благородных металлов, крупность и удельные поверхности их частиц в рудах чрезвычайно разнообразны. Эта особенность требует разработки технологий, которые кроме обеспечения высокого извлечения благородных металлов были бы максимально адаптированы к уже существующим основным обогатительным переделам [3]. Необходимо отметить, что при организации попутного извлечения благородных металлов на действующих предприятиях затраты на добычу руд и их измельчение, а это обычно составляет 80–90 % от всех затрат производства, окуплены основной продукцией. Поэтому рентабельность попутного извлечения благородных металлов обычно весьма высока, что позволяет извлекать их из руд при содержании 0,1–0,2 г/т [3–9].

Целью настоящей работы являлось исследование эффективности выделения МПГ в цикле измельчение—классификация методом магнито-жидкостной сепарации в разноплотных магнитных жидкостях в качестве среды разделения.

Разработка средств и метода решения задачи

На Норильской обогатительной фабрике внедрена гравитационно-флотационная технология обогащения вкрапленных руд месторождения «Норильск-1», в соответствии с которой металлы платиновой группы и золото выделяют из разгрузки мельницы 1-й стадии измельчения центробежными концентраторами типа Knelson-48' [10]. Извлечение платиноидов из концентрата, выделенного из руд гравитационными методами обогащения, на медном заводе компании составляет 93–94 %. При получении концентрата с содержанием суммы МПГ более 2 % его можно направить, минуя медный завод, на гидрометаллургический передел с извлечением МПГ на уровне 99,5 % [11].

Таким образом, задача производства богатых по сумме МПГ концентратов является актуальной, решение которой позволит уменьшить на 5 абс.% их потери при металлургической переработке.

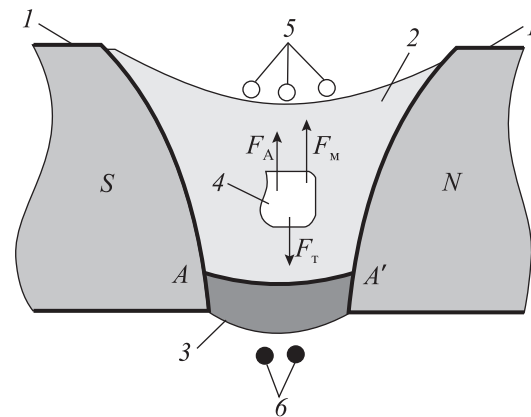


Рис. 1. Схема способа магнито-жидкостной сепарации с двумя несмешивающимися ферромагнитными жидкостями разной плотности

1 – полюсные наконечники электромагнитной системы; 2 и 3 – соответственно слой легкой и плотной ферромагнитной жидкости; 4 – твердое тело; 5 и 6 – легкие и тяжелые частицы

Сепарация золотосодержащих материалов по плотности в размещенной в неоднородном магнитном поле ферромагнитной жидкости (ФМЖ) позволяет выделять МПГ [12], шлиховое золото [13] и другие металлы [14, 15] в тяжелую фракцию сепарации. Однако с увеличением производительности процесса точность разделения материала по плотности уменьшается, увеличиваются потери с легкой фракцией сепарации дорогостоящей ФМЖ. Основной причиной снижения эффективности процесса разделения с ростом концентрации частиц в рабочей зоне [16, 17] является их взаимодействие в условиях стесненного падения.

Качество разделения и полнота извлечения тонких и мелких частиц благородных металлов становятся иными, если в рабочей зоне сепаратора двумя несмешивающимися ФМЖ с разными плотностями будет создана поверхность раздела $A-A'$ (рис. 1).

Рабочий зазор между полюсными наконечниками 1 магнитной системы заполняют разбавленной ФМЖ на водной основе 2, которая опирается на тонкий слой плотной ФМЖ на основе углеводорода 3, например керосина. В случае немагнитной частицы 4, размещенной внутри ФМЖ, выполняется второй закон Ньютона: сумма выталкивающих сил — Архимеда (F_A) и пондеромоторной магнитной (F_M) — равна силе тяжести (F_T):

$$\rho_1 g V + \mu_0 \mathbf{M} |\nabla H| V = \rho_2 g V, \quad (1)$$

где ρ_1 и ρ_2 — плотности ФМЖ и частицы соответственно, кг/м^3 ; g — ускорение свободного падения,

m/c^2 ; V — объем частицы, m^3 ; μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, Гн/м; ∇H — вектор градиента напряженности магнитного поля, А/м²; M — вектор намагниченности среды, А/м.

Если сила Архимеда (F_A) и вертикальная составляющая силы тяжести (F_T^y) являются постоянными величинами, то вертикальная составляющая пондеромоторной магнитной силы (F_M^y) может быть изменена, например за счет силы тока возбуждения в намагничивающей катушке. При надлежащем выборе направления силы F_M^y ферромагнитная жидкость как бы «утяжеляется» до эффективной плотности:

$$\rho_{\text{эф}} = \rho_1 + F_M^y/g,$$

что проявляется в изменении суммы выталкивающих сил, действующих на погруженную в нее немагнитную частицу. Горизонтальная составляющая силы F_M^x оказывает влияние на траекторию движения частиц в объеме ФМЖ.

Легкие частицы a «всплывают» за счет того, что $(F_A + F_M) > F_T$; для тяжелых частиц b сумма выталкивающих сил $(F_A + F_M) < F_T$, и они «тонут». Для частиц, плотность которых равна эффективной плотности $\rho_{\text{эф}}$, выполняется равенство (1), и они распределяются поровну по продуктам разделения.

В разработанном способе сепарации к стратификации ФМЖ по плотности добавляется стратификация по смачиваемости. Избирательное смачивание водой минералов пустой породы и золота затрудняет их агрегацию [18–22], что повышает эффективность процесса МЖ-сепарации материала с «физически» упорными формами золота (мелким и тонким) и снижает взаимные потери разделяемых частиц с фракциями разной плотности. Большой объем разбавленной ФМЖ на водной основе позволяет эффективно выводить из рабочей зоны легкую фракцию, что также повышает производительность процесса МЖ-сепарации.

Уменьшение численной концентрации разделяемых частиц в рабочей зоне после удаления легкой фракции (количественно преобладающей) изменяет стесненное падение частиц на свободное: на плотном слое ФМЖ силы взаимодействия между разнородными частицами не оказывают влияния на разделение по плотности. Тонкий слой плотной ФМЖ сводит к минимуму путь и время удаления из зоны сепарации тяжелой фракции. Применение ФМЖ на водной основе позволяет исключить операцию обезвоживания (сушки) исходного пита-

ния перед магнитожидкостной сепарацией и вести процесс с подачей влажного материала, что уменьшает технологические затраты.

Среда разделения в виде несмешивающихся ФМЖ с разной плотностью позволяет в одном аппарате вести процесс разделения одновременно в двух технологических режимах — «гравитационного решета» и «с опорным слоем». Подрешетная фракция, прошедшая через гравитационное решето в виде разбавленной водной ФМЖ, перечищается на плотном опорном слое ФМЖ на углеводородной основе. Таким образом, при наличии в зоне сепарации разделяющей поверхности процесс магнитожидкостной сепарации приобретает принципиально новые возможности, становится универсальным, а само разделение — более точным.

В работе [23] показано, что с увеличением индукции магнитного поля равновесное состояние, отвечающее плоской поверхности раздела жидкостей, теряет устойчивость. Это проявляется в возникновении на поверхности раздела жидкостей периодических волн.

Поверхностное натяжение между слоями несмешивающихся ФМЖ является причиной искривления разделяющей их поверхности [24]. В системе с твердой частицей на искривленной поверхности раздела имеет место линейное натяжение f [25]. Подобно тому, как отклонение от закона Паскаля — анизотропия давления на искривленной поверхности раздела двух фаз — лежит в основе существования поверхностного натяжения σ , так и при искривлении линии трехфазного контакта линейное натяжение f является причиной появления двумерного натяжения (давления) σ_f . Условие механического равновесия частицы на плоской поверхности, записанное согласно закону Юнга и правилу Неймана как

$$\sigma_{AB} - \sigma_{AC} \cos \theta - \sigma_{BC} = 0, \quad (2)$$

в случае частицы C на искривленной поверхности раздела несмешивающихся ферромагнитных жидкостей A и B (рис. 2) должно быть дополнено натяжением σ_f :

$$\sigma_{AB} - \sigma_{AC} \cos \theta - \sigma_{BC} - \sigma_f \cos \psi = 0. \quad (3)$$

К балансу энергий образования поверхности C между жидкими фазами A и B при учете линейного натяжения f следует добавить член $2\pi r f$.

Введение в уравнение (1) натяжения σ_f аналогично увеличению межфазного натяжения жидкостей σ_{AB} .

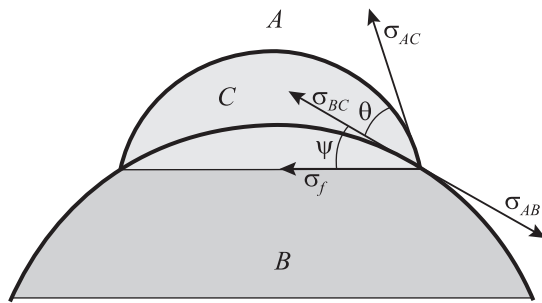


Рис. 2. Баланс натяжений на искривленной линии трехфазного контакта
Случай $\psi = 0$ соответствует плоской поверхности подложки B

С уменьшением радиуса периметра смачивания (r) двумерное давление (или натяжение) $\sigma_f = f/r$ увеличивается и становится силовым и энергетическим барьером, препятствующим закреплению мелких частиц на межфазной границе, а также причиной их эффективного извлечения в тяжелую фракцию МЖ-сепарации.

Результаты исследований и их анализ

Экспериментальные исследования выполнены на пробе гравитационного концентрата, выделенного в условиях фабрики в цикле измельчения на центробежных концентраторах Knelson-48' (табл. 1).

Основное количество металлов в гравикоцентрате связано с классом крупности $(-0,215 + 0,040)$ мм: с его увеличением или уменьшением извлечение металлов снижается. Распределение МПГ по классам крупности пропорционально их выходу. Наиболее распространенным минералом платины является сперрилит.

Гравиоконцентрат крупностью $(-0,9+0,125)$ мм перечищали гравитационными способами, а $(-0,125+0)$ мм — флотационными методами обогащения (рис. 3).

При перечистке гравиоконцентрата на концентратном столе типа СКО-0,2, согласно матрице планирования эксперимента, изменяли число ходов деки стола ($n = 260+340 \text{ мин}^{-1}$), длину хода деки ($l = 6+16 \text{ мм}$) и расход смывной воды ($q = 1,1+2,7 \text{ м}^3/\text{т}$); постоянными были угол поперечного наклона деки (5°), содержание твердого в питании (15 мас.%) и ширина веера концентрата на деке. В оптимальном режиме ($n = 330 \text{ мин}^{-1}$, $l = 7 \text{ мм}$, $q = 2,3 \text{ м}^3/\text{т}$) в тяжелую фракцию стола извлечено 31,37 % МПГ при их содержании 13853 г/т. Дальнейшее повышение качества концентрата стола по схеме «магнитная сепарация → магнитожидкостная сепарация немагнитной фракции» оказывается неэффективным по причине значительных потерь ферроплатины с магнитной фракцией.

Перечистку гравиоконцентрата методом флотации осуществляли по схеме со струйным движением исходного питания и черного концентрата. Во 2-й струе флотации в качестве флотационного аппарата применяли флотомашину колонного типа, а в качестве газовой фазы — аэрозоль в виде смеси воздуха с горячим ($105-110 \text{ }^\circ\text{C}$) водяным паром.

Использовали противоточную колонну диаметром 47 мм и высотой 1,97 м (1,55 м — высота зоны минерализации, а 0,42 м — зоны очистки). При приведенной скорости пульпы 1,17 см/с удельная производительность колонны по исходному продукту достигала $10,1 \text{ м}^3/(\text{ч}\cdot\text{м}^3)$, а по пенно-

Таблица 1

Гранулометрический состав гравикоцентрата и распределение металлов по классам крупности

Класс крупности, мм	Выход, %	Содержание, %						Извлечение, %					
		Pt	Pd	Au*	Ag*	Ni	Cu	Pt	Pd	Au	Ag	Ni	Cu
-0,9+0,4	4,30	22,73	48,09	8,05	4,50	2,14	2,44	0,74	1,30	1,74	2,30	4,55	5,05
-0,4+0,215	14,03	85,66	95,80	10,56	7,44	1,31	2,62	9,10	8,45	7,45	12,92	9,10	17,68
-0,215+0,125	27,14	204,72	234,15	27,93	12,90	2,20	2,57	42,07	39,95	38,11	43,01	29,55	33,50
-0,125+0,063	12,99	174,97	212,22	26,90	9,99	2,28	2,16	17,21	17,33	17,57	15,93	14,65	13,47
-0,063+0,040	24,07	145,13	185,64	24,97	7,01	2,17	1,76	26,45	28,09	30,22	20,71	25,91	20,36
-0,040	17,47	33,49	44,43	5,59	2,41	1,88	1,18	4,43	4,88	4,91	5,13	16,24	9,94
	100	132,07	159,07	19,89	143,91	2,02	2,08	100	100	100	100	100	100

* Содержание Au и Ag приведено в г/т.

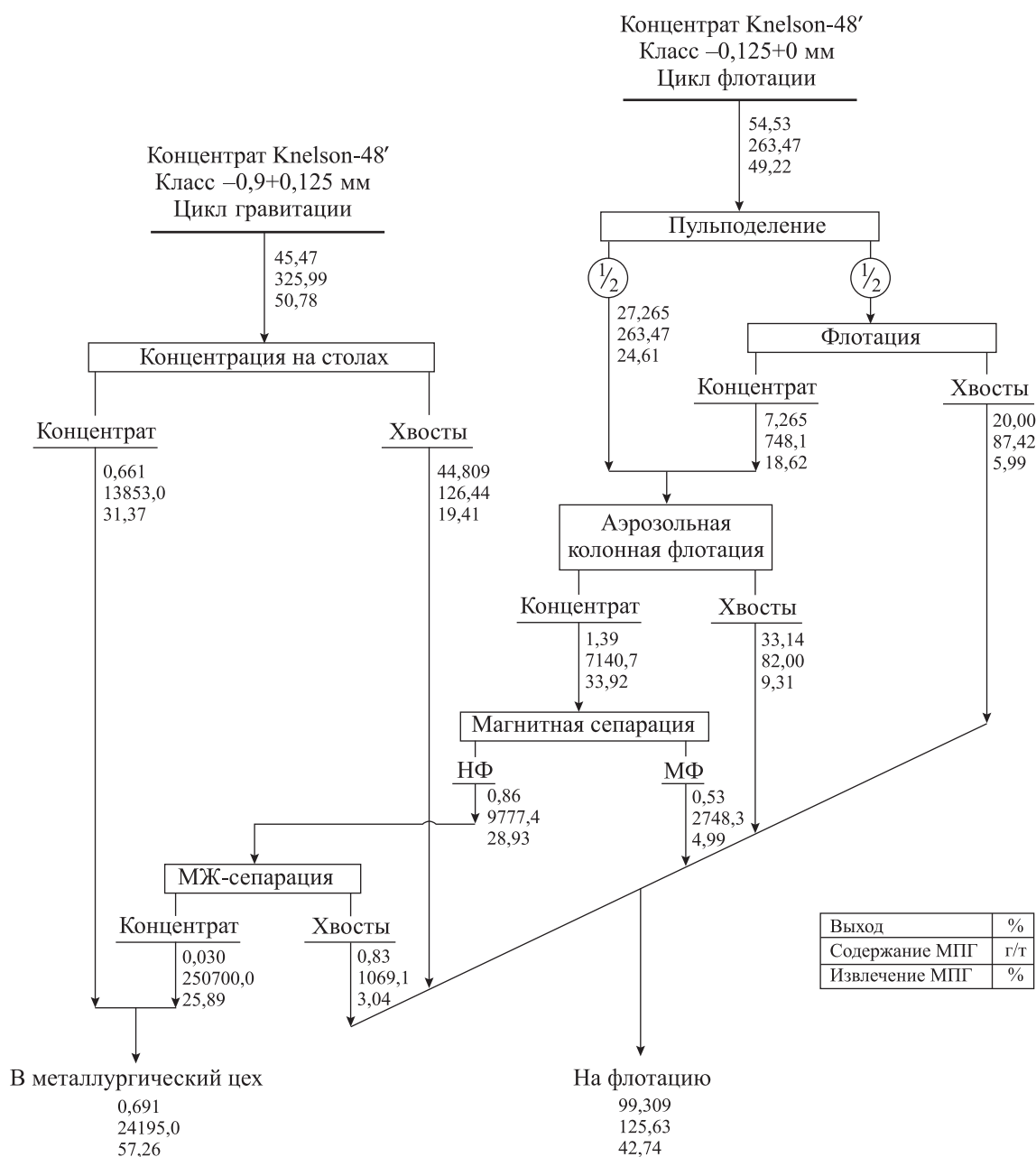


Рис. 3. Качественно-количественная схема доводки гравитационного концентрата с применением МЖ-сепаратора со средой разделения из двух несмешивающихся разноплотных ферромагнитных жидкостей

му продукту — $2,8 \text{ м}^3/(\text{ч}\cdot\text{м}^3)$. Для подавления механического выноса нефлотируемых частиц в концентрат расход промывной воды поддерживали на уровне $0,032 \text{ м}^3/(\text{мин}\cdot\text{м}^3)$, что обеспечивало превышение на 5—7 % потока воды в хвосты над потоком воды в питание. Аэрозоль в виде спутных потоков насыщенного водяного пара и воздуха подавали боковым донным инжектором конфузоро-диффузорного типа. Давление воздуха на входе в аэратор составляло $0,12\text{—}0,15 \text{ МПа}$, а на входе в эрлифт —

$0,07\text{—}0,19 \text{ МПа}$, давление инжектируемого пара — $0,12 \text{ МПа}$. В колонну подавали воздух из расчета $0,70 \text{ м}^3/\text{мин}$ на 1 м^2 ее сечения, расход воздуха в эрлифте — $0,045 \text{ м}^3/(\text{мин}\cdot\text{м}^3)$. Газосодержание во флотационной колонне было на уровне 14—16 %.

В концентрат флотации извлечено 33,92 % МПГ при содержании 7140,7 г/т МПГ. С применением двухвалкового магнитного сепаратора конструкции ООО «НПП ГЕОС» из флотационного концентрата выделена немагнитная фракция (с на-

Таблица 2

Результаты доводки гравикоцентра МЖ-сепарацией в ферромагнитной жидкости на основе керосина

Продукт	Выход, %		Содержание МПГ, г/т	Извлечение МПГ, %	
	от операции	от исходного		от операции	от исходного
Концентрат стола	1,45	0,661	13853	61,78	31,37
Концентрат МЖ-сепарации	3,49	0,0269	214096	68,20	19,73
Итого (концентрат)		0,6879	21683,5		51,10
Хвосты стола	98,55	44,809	126,44	38,22	19,41
Хвосты флотации	97,40	53,14	84,04	31,08	15,30
Магнитная фракция	38,13	0,53	2748,3	14,71	4,99
Хвосты МЖ-сепарации	96,51	0,8331	3223,5	10,51	9,20
Итого (хвосты)		99,3121	143,7		48,90

пряженностью магнитного поля в рабочей зоне 1000 Э, а затем и 3000 Э), содержащая 9777,4 г/т МПГ; потери платины (за счет ферроплатины) с магнитной фракцией составили 4,99 %.

В качестве «тяжелого» слоя выбрана ФМЖ типа магнетит в керосине, стабилизированная олеиновой кислотой:

- физическая плотность $\rho = 850 \text{ кг/м}^3$;
- объемная концентрация частиц магнетита $C = 2 \%$;
- намагниченность насыщения $I_s = 10 \text{ кА/м}$;
- динамическая вязкость $\varphi = 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$.

В качестве «легкого» слоя выбрана ФМЖ типа магнетит в воде, стабилизированная лимонной кислотой:

- физическая плотность $\rho = 1050 \text{ кг/м}^3$;
- объемная концентрация частиц магнетита $C = 11 \%$;
- намагниченность насыщения $I_s = 46 \div 54 \text{ кА/м}$;
- удельная намагниченность насыщения $J_s = 45 \div 47 \text{ Гс}\cdot\text{см}^3/\text{г}$;
- магнитная восприимчивость $\chi = 3,8 \div 5,0$;
- магнитный момент частицы $m = (4,5 \div 4,7) \cdot 10^{-19} \text{ А}\cdot\text{м}^2$;
- численная концентрация частиц $n = (1 \div 1,76) \cdot 10^{-23} \text{ м}^3$;
- средний размер $d_{cp} = 10 \text{ нм}$;
- магнитная восприимчивость частиц в порошке 0,0015.

Применен магнитожидкостный сепаратор с двухполюсной электромагнитной системой U-образной формы с полюсами гиперболической конфигурации:

- длина полюсов 400 мм;
- ширина полюсов в узкой части 50 мм;

— высота полюсов 150 мм;

— магнитная индукция в узкой части зазора составляла 0,8 Тл;

— постоянный ток в обмотках возбуждения до 25 А;

— напряжение в обмотках возбуждения до 250 В.

Показатели магнитного поля электромагнитной системы следующие:

— напряженность магнитного поля в рабочем зазоре $5,4 \cdot 10^5 \text{ А/м}$;

— вектор градиента напряженности магнитного поля $85 \cdot 10^5 \text{ А/м}^2$;

— направление вектора градиента напряженности магнитного поля противоположно направлению силы тяжести;

— сила магнитного поля ($H \text{ grad} H$) в области рабочего зазора магнитопровода магнитного сепаратора $3,5 \cdot 10^{12} \text{ А}^2/\text{м}^3$.

Извлечение МПГ в тяжелую фракцию МЖ-сепаратора со средней разделением из двух несмешивающихся (на основе воды и керосина) разноплотных (1050 и 850 кг/м³ соответственно) ферромагнитных жидкостей составило 25,89 % (см. рис. 3), в то время как при его сепарации в ФМЖ на основе керосина оно было на 6,16 % меньше (табл. 2).

В результате исследований получен продукт, в который извлечено 57,26 % МПГ при содержании 24195 г/т МПГ, что позволяет напрямую его переработать в гидрометаллургическом цехе, минуя медный завод.

Выполнена оценка экономической эффективности доводки гравитационного концентрата по разработанной технологии.

Результаты расчета прибыли от гидрометаллургической переработки 1 т гравитационного кон-

центра с содержанием 24195 г/т МПГ приведены ниже:

Объем реализации дополнительной товарной продукции, %, в том числе.....	5,0
Pt, г.....	832,5
Pd, г.....	377,3
Финансовый результат от деятельности (в ценах 2016 г.), \$ US, в том числе	32599,8
Pt	26098,9
Pd.....	6500,9
Полная себестоимость доводки гравикоцентра и получения аффинированных металлов, \$ US.....	12892,0
Налогооблагаемая прибыль, \$ US	19707,8
Чистая прибыль, \$ US	15766,2

Таким образом, экономический эффект от применения предложенной технологии доводки концентратов центробежных сепараторов Knelson-48' до продукта, содержащего >2 % МПГ, составил 15766,2 \$ US на 1 т гравикоцентра.

Заключение

Разработан метод доводки черновых гравитационных концентратов центробежных сепараторов Knelson-48'. Его технологическая схема включает операции концентрации на столах класса крупности (-0,9+0,125) мм и флотации класса крупности (-0,125+0) мм. Концентрат стола объединяют с продуктом доводки концентрата флотации.

Концентрат флотации после выделения магнитной фракции направляют на магнитожидкостную сепарацию, отличающуюся от известных тем, что в качестве среды разделения применяют ферромагнитные жидкости на основе воды и керосина, причем физическая плотность первой выше, чем второй. При сепарации в несмешивающихся разноплотных ферромагнитных жидкостях извлечение МПГ в тяжелую фракцию составляет 25,89 % против 19,73 % при сепарации в ФМЖ на основе только керосина (или воды).

При суммарном извлечении МПГ 57,26 % качество продукта доводки позволяет сократить число операций при его металлургической переработке, что увеличивает извлечение платиноидов на 5,0 абс. %.

Статья подготовлена в рамках Соглашения о предоставлении субсидии № 14.577.21.0142 (RFMEFI57714X0142).

Литература

1. Евдокимов С.И., Евдокимов В.С. Переработка руд и техногенного медно-никелевого сырья с применением технологии струйной паровоздушной флотации // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2015. No. 2. С. 3—8.
2. Дуаките М.Л.Л. Извлечение платиновых металлов при переработке хромитовых руд дунитовых массивов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб: НМСУ «Горный», 2013.
3. Богданович А.В., Зарогатский Л.П., Коровников А.Н. Современные оборудование и технологии высокоэффективного извлечения тонкозернистого золота из россыпных, рудных и техногенных видов сырья России // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 1999. No. 5. С. 7—10.
4. Козлов А.П., Матвеева Т.Н., Толстых Н.Д., Федотов К.В., Чантурия В.А. Разработка технологических процессов извлечения платины из дунитов платиноносного пояса Урала // Обогащение руд. 2013. No. 5. С. 8—16.
5. Матвеева Т.Н. Научное обоснование высокоэффективных реагентных режимов извлечения платиносодержащих сульфидных минералов из труднообогатимых руд // Физ.-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. 2011. No. 6. С. 128—134.
6. Zhang J., Zhang Y., Richmond W., Wang H. Processing technologies for gold-telluride ores // Int. J. Miner., Metal., Mater. 2010. Vol. 17. No. 1. P. 1—10.
7. Faraz Z. Improved recovery of a low-grade refractory gold ore using flotation-preoxidation-cyanidation methods // Int. J. Mining Sci. Technol. 2014. Vol. 24. No. 4. P. 537—542.
8. Valderrama L., Rubio J. Unconventional column flotation of low-grade gold fine particles from tailings // Int. J. Miner. Process. 2008. Vol. 86. P. 75—84.
9. Nam K.S., Jung B.H., Ah J.W., Ha T.J., Tran T., Kim M.J. Use of chloride-hypochlorite leachants to recover gold from tailing // Int. J. Miner. Process. 2008. Vol. 86. P. 131—140.
10. Благодатин Ю.В., Яценко А.А., Салайкин Ю.А., Захаров Б.А., Погосян Г.Р. Развитие технологии гравитационного обогащения на Норильском комбинате // Цвет. металлы. 1998. No. 10-11. С. 29—31.
11. Благодатин Ю.В., Захаров Б.А., Чегодаев В.Д. Разработка схемы доводки первичных гравикоцентратов, полученных при переработке вкрапленных руд на Норильской ОФ // Основные направления развития обогащения сульфидных руд в 21-м веке: Доклады Междунар. НТК (г. Норильск, 24—27 апр. 2000 г.). Норильск: Норникель, 2000. С. 130—131.

12. Солоденко А.А. Развитие теории и практики переработки золотосодержащего сырья комбинированными методами обогащения: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. Владикавказ: СКГМИ, 2016.
13. Паньшин А.М., Евдокимов С.И. Применение метода магнито-жидкостной сепарации при обогащении золотосодержащих россыпей // Горн. журн. 2010. No. 1. С. 75—77.
14. Паньшин А.М., Евдокимов С.И., Солоденко А.А. Минералургия. Т. 1. Золото: теория и промысел. Владикавказ: НПКП «Мавр», 2010.
15. Евдокимов С.И., Евдокимов В.С. Получение товарной продукции из отходов гидрометаллургического производства триоксида вольфрама // Горн. журн. 2014. No. 9. С. 125—127.
16. Тихонов О.Н. Теория разделения минералов. СПб.: Наука, 2008.
17. Евтушенко М.Б. Повышение эффективности обогащения золотосодержащего сырья на основе тонкослойной магнито-гравитационной сепарации: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: ИПКОН, 2004.
18. Яминский Я.В., Амелина Е.А., Шукин Е.Д. Силы взаимодействия между неполярными твердыми частицами в жидких средах // Поверхностные силы в тонких пленках: Сб. докл. VI Конф. по поверхностным силам (г. Москва, 4—7 дек. 1979 г.). М.: Наука, 1979. С. 13—20.
19. Englert A.H., Krasowska M., Formasiero D., Raiston J., Rubio J. Interaction force between an air bubble and a hydrophilic spherical particle in water, measured by the colloid probe technique // Int. J. Miner. Process. 2009. Vol. 92. No. 3-4. P. 121—127.
20. Евдокимов С.И., Паньшин А.М., Солоденко А.А. Минералургия. Т. 2. Успехи флотации. Владикавказ: НПКП «Мавр», 2010.
21. Pan L., Jung S. Yoon R.-H. Effect of hydrophobicity on the stability of the wetting films of water formed on gold surfaces // J. Colloid Interface Sci. 2011. Vol. 361. No. 1. P. 321—330.
22. Mishchuk N.A. The model of hydrophobic attraction in the framework of classical DLVO forces // Adv. Colloid Interface Sci. 2011. Vol. 168. No. 1-2. P. 149—166.
23. Борислов И.Д., Пославский С.А., Руднев Ю.И. Устойчивость равновесия системы несмешивающихся токонесущих жидкостей в магнитном поле // Прикладная гидромеханика. 2006. Т. 8. No. 4. С. 3—14.
24. Федоров М.С. Поверхностные и внутренние волны в стратифицированной жидкости: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Ярославль: ЯГУ, 2014.
25. Шелудко А., Тошев Б.В., Платиканов Д. О механике и термодинамике систем с линией трехфазного

контакта // Современная теория капиллярности: К 100-летию теории капиллярности Гиббса / Под ред. А.И. Русанова, Ф.Ч. Гудрича. Л.: Химия, 1980. С. 274—299.

References

1. Yevdokimov S.I., Yevdokimov V.S. Pererabotka rud i tekhnogenogo medno-nikelevogo siyrya s primeneniem tekhnologii struinoi parovozdushnoi flotatsii [Processing of ores and technogenic copper-nickel material using the technology of jet air-steam flotation]. *Izv.vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2015. No. 2. P. 3—8.
2. Diakite M.L.L. Izvlechenie platinoviykh metallov pri pererabotke khromitoviykh rud dunitoviykh massivov [Recovery of platinum group metals in the processing of chromite ore dunitite massifs]: Abstr. dis. PhD. St. Petersburg: NMRU «Gorniyi», 2013.
3. Bogdanovich A. V., Zarogatskii L.P., Korovnikov A.N. Sovremenniy oborudovaniye i tekhnologii viysokoeffektivnogo izvlecheniya tonkozernistogo zolota iz rossiyppnykh, rudnykh i tekhnogennykh vidov siyrya Rossii [Modern equipment and technologies for high performance extraction of fine-grained gold from gravel, ore and industrial raw materials Russia]. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 1999. No. 5. P. 7—10.
4. Kozlov A.P., Matveeva T.N., Tolstiykh N.D., Fedotov K.V., Chanturiya V.A. Razrabotka tekhnologicheskikh protsessov izvlecheniya platinii iz dunitov platinonosnogo poyasa Urala [Development of technological processes of extraction of platinum from dunitite of the Uralian platinum belt]. *Obogasheniye rud*. 2013. No. 5. P. 8—16.
5. Matveeva T.N. Nauchnoye obosnovaniye viysokoeffektivnykh reagentnykh rezhimov izvlecheniya platinonosnykh sulfidnykh mineralov iz trudnoobogatimiykh rud [Scientific grounds for high-performance reagent modes of extraction of platinum-containing sulfide minerals from rebellious ores]. *Fiziko-tekhnicheskie problemiy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2011. No. 6. P. 128—134.
6. Zhang J., Zhang Y., Richmond W., Wang H. Processing technologies for gold-telluride ores. *Int. J. Miner., Metal., Mater.* 2010. Vol. 17. No. 1. P. 1—10.
7. Faraz Z. Improved recovery of a low-grade refractory gold ore using flotation-preoxidation-cyanidation methods. *Int. J. Mining Sci. Technol.* 2014. Vol. 24. No. 4. P. 537—542.
8. Valderrama L., Rubio J. Unconventional column flotation of low-grade gold fine particles from tailings. *Int. J. Miner. Process.* 2008. Vol. 86. P. 75—84.
9. Nam K.S., Jung B.H., Ah J.W., Ha T.J., Tran T., Kim M.J. Use of chloride-hypochlorite leachants to recover gold

- from tailing. *Int. J. Miner. Process.* 2008. Vol. 86. P. 131—140.
10. *Blagodatin Yu.V., Yatsenko A.A., Salaikin Yu.A., Zakharov B.A., Pogosyan G.R.* Razvitie tekhnologii gravitatsionnogo obogasheniya na Norilskom kombinatе [The development of the technology of gravitational enrichment at the Norilsk plant]. *Tsvet. metalliy.* 1998. No. 10-11. P. 29—31.
 11. *Blagodatin Yu.V., Zakharov B.A., Chegodaev V.D.* Razrabotka skhemiy dovodki pervichnykh graviokonzentratov, poluchennykh pri pererabotke vkraplennykh rud na Norilskoi OF [Development of schemes of refining of the primary gravity concentrates obtained in the processing of disseminated ores OF the Norilsk]. In: *Osnovniye napravleniya razvitiya obogasheniya sulfidnykh rud v 21 veke: Doklady Mezhdunarodnoi NTK* [The main directions of development of the enrichment of sulphide ores in the 21st century: Reports of International scientific-technical conferences] (Norilsk, 24—27.04.2000). Norilsk: Nornikel, 2000. P. 130—131.
 12. *Solodenko A.A.* Razvitie teorii i praktiki pererabotki zolotosoderzhashego siyrya kombinirovannymi metodami obogasheniya [The development of the theory and practice of processing gold ores combined methods of enrichment]: Abstr. dis. PhD. Vladikavkaz: NCNI (STU), 2016.
 13. *Panshin A.M., Yevdokimov S.I.* Primenenie metoda magnitozhidkostnoi separatsii pri obogashenii zolotosoderzhashikh rossiypеi [Application of the method of magneto-liquid separation in the enrichment of gold placers]. *Gorniy zhurnal.* 2010. No. 1. P. 75—77.
 14. *Panshin A.M., Yevdokimov S.I., Solodenko A.A.* Mineralurgiya. Vol. 1. Zoloto: Teoriya i promysel [Gold: theory and fisheries]. Vladikavkaz: NPKP «MAVR», 2010.
 15. *Yevdokimov S.I., Yevdokimov V.S.* Poluchenie tovarnoi produktsii iz otkhodov gidrometallurgicheskogo proizvodstva trioksida volframa [Recovery of commercial products from waste of hydrometallurgical production of tungsten trioxide]. *Gorniy zhurnal.* 2014. No. 9. P. 125—127.
 16. *Tikhonov O.N.* Teoriya razdeleniya mineralov [The theory of separation of minerals]. St. Peterburg: Nauka, 2008.
 17. *Yevtushenko M.B.* Povysheniye effektivnosti obogasheniya zolotosoderzhashego siyrya na osnove tonkosloinoi magnetogravitatsionnoi separatsii [Improving the efficiency of enrichment of gold-bearing raw materials on the basis of thin-layer separation magnetogravitational]: Abstr. dis. PhD. Moscow: IPKON, 2004.
 18. *Yaminskii Ya.V., Amelina E.A., Shukin E.D.* Siliy vzaimodeistviya mezhdu nepolyarnymi tverdiymi chastitsami v zhidkikh sredakh. In: *Poverkhnostniye siliy v tonkikh plenkakh* [The forces between non-polar solid particles in liquid media. In: *Surface forces in thin films: a Collection of papers VI Conference on surface forces* (Moscow, 04—07 December 1979)]. Moscow: Nauka, 1979. P. 13—20.
 19. *Englert A.H., Krasowska M., Formasiero D., Raiston J., Rubio J.* Interaction force between an air bubble and a hydrophilic spherical particle in water, measured by the colloid probe technique. *Int. J. Miner. Process.* 2009. Vol. 92. No. 3-4. P. 121—127.
 20. *Yevdokimov S.I., Panshin A.M., Solodenko A.A.* Mineralurgiya. Vol. 2. Uspekhi flotatsii [The success of flotation]. Vladikavkaz: NPKP «MAVR», 2010.
 21. *Pan L., Jung S. Yoon R.-H.* Effect of hydrophobicity on the stability of the wetting films of water formed on gold surfaces. *J. Colloid Interface Sci.* 2011. Vol. 361. No. 1. P. 321—330.
 22. *Mishchuk N.A.* The model of hydrophobic attraction in the framework of classical DLVO forces. *Adv. Colloid Interface Sci.* 2011. Vol. 168. No. 1-2. P. 149—166.
 23. *Borislov I.D., Poslavskii S.A., Rudnev Yu.I.* Ustoichivost ravovesiya sistemiy nesmeshuvayushikhnya tokoneshikh zhudkosti v magnitnom pole [Stability of equilibrium of a system of immiscible current-carrying liquids in a magnetic field]. *Prikladnaya gidromekhanika.* 2006. Vol. 8. No. 4. P. 3—14.
 24. *Fedorov M.S.* Poverkhnostniye i vnutrennie volny v stratifitsirovannoi zhidkosti [Surface and internal waves in a stratified fluid]: Dis. PhD. Yaroslavl: Yaroslavskii gosudarstvennyi universitet, 2014.
 25. *Sheludko A., Toshev B.V., Platikanov D.* O mekhanizme i termodinamike sistem s liniei trekhfaznogo kontakta. In: *Sovremennaya teoriya kapillyarnosti: K 100-letiyu teorii kapillyarnosti Gibbsa* [The mechanics and thermodynamics of systems with three-phase contact line. In: *The modern theory of capillarity: To the 100 anniversary of the theory of Gibbs capillarity*]. Eds. Rusanov A.I., Gudrich F.Ch. Leningrad: Khimiya, 1980. P. 274—299.