



DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-92-101

УДК 669.2

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ОБЖИГ РУДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТОМТОР И ЕГО ОСОБЕННОСТИ

М.Ю. Малькова, А.Н. Задиранов

Российский университет дружбы народов
Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, 3

Проведены исследования кинетики изменения содержания фосфора, ниобия, ванадия и титана при высокотемпературном обжиге руды месторождения Томтор в смеси с активными добавками: бикарбонатом (NaHCO_3), карбонатом натрия (Na_2CO_3), щелочами (KOH , NaOH). Предложено уравнение кинетики обжига руды и рассчитаны значения постоянной скорости высокотемпературного обжига руды для фосфора, ниобия, ванадия и титана при различных условиях. Получены зависимости постоянной скорости высокотемпературного обжига руды в атмосфере кислорода воздуха, аргона и молекулярного хлора от температуры обжига и содержания активных добавок. Установлено, что в атмосфере кислорода воздуха обжиг руды проходит наиболее эффективно с добавками NaHCO_3 , Na_2CO_3 , NaOH , взятыми в соотношении (1:1). Показано, что обжиг руды в смеси с карбонатами и щелочами позволяет переводить в раствор при последующем выщелачивании не менее 95,0% фосфора и 44,0% ванадия, содержащихся в исходной руде. Установлено, что наибольшей скоростью в атмосфере кислорода воздуха характеризуется обжиг руды в смеси с NaHCO_3 и NaOH . Рассчитаны постоянные скорости этого процесса для фосфора и ванадия. Установлено, что образующийся после обжига руды кек, требует дополнительной переработки, поскольку содержит высокие концентрации ванадия и других ценных металлов.

Ключевые слова: руда, месторождение Томтор, кек, ниобий, ванадий, титан, фосфор, обжиг, кинетика, редкоземельные металлы

Введение

Известно [1–8], что руды месторождения Томтор являются уникальным источником редкоземельных металлов (далее РЗМ), ниобия и других ценных металлов. В связи с минералогическими особенностями [9–14] переработка руды месторождения Томтор методами традиционного обогащения признана малоэффективной, требуя разработки специальной схемы. Однако учитывая значительные содержания в руде редкоземельных элементов (~12%) и относительно высокое содержание ниобия (~6% Nb_2O_5) [1; 4–8], в настоящее время перспективным и экономически оправданным представляется применение комбинированных методов пиро- и гидрометаллургии.

Цель данной работы заключается в изучении особенностей высокотемпературного обжига руды месторождения Томтор в смеси с активными добавками: гидрокарбонатом (NaHCO_3), карбонатом натрия (Na_2CO_3) и щелочами (KOH , NaOH). Для выполнения цели работы провели серию лабораторных испытаний,

посвященных изучению кинетики обжига измельченной руды в смеси с NaHCO_3 , Na_2CO_3 , KOH и NaOH.

Методика проведения экспериментов

Обжиг подготовленных проб руды вели на установке (рис. 1), где алундовый тигель со смесью помещали в нагревательную печь 7 для обжига. Продували тигель газом (аргон, хлор) через фурму 4. Расход газа составлял 0,2 л/мин. Длительность обжига смеси составляла от 1 до 5 ч. По окончании обжига тигель извлекали из печи, а находящийся в нем материал (промпродукт) охлаждали, загружали в химический стакан, заливали водой и перемешивали магнитной мешалкой. Образовавшийся в стакане нерастворимый осадок фильтровали. Отфильтрованный осадок снова загружали в химический стакан, повторяя процессы перемешивания и фильтрации. После последней фильтрации осадок высушивали в печи при температуре 150 °С в течение 1,5 ч. Образовавшийся сухой осадок (кек) взвешивали, от него отбирали пробу для проведения химического анализа.

Эффективность перевода элементов руды в раствор оценивали, определяя уровень остаточного содержания i -го компонента руды, %:

$$\Delta_{\text{ост}} = (C_{\text{к}}/C_{\text{н}})100, \quad (1)$$

а также используя уравнение кинетики первого порядка:

$$v = dC/dt = -kC, \quad (2)$$

решение которого принимает следующий вид:

$$k_i = \ln(C_{\text{н}}/C_{\text{к}})/t, \quad (3)$$

где k_i — постоянная скорости процесса обжига i -го компонента измельченной руды, с^{-1} ; $C_{\text{н}}$ и $C_{\text{к}}$ — начальная и конечная концентрации элемента руды, %; t — длительность обжига руды, с.

Результаты экспериментов

Результаты проведенных серий экспериментов и расчетные значения $\Delta_{\text{ост}}$ и k_i (рис. 1, таблица) с высокой степенью вероятности ($R^2 > 76,97\%$) показывают, что значения постоянной скорости (k_i , с^{-1}) высокотемпературного обжига руды (в атмосфере воздуха) в значительной мере определяют состав смеси (соотношение основного компонента и разбавителя) и условия ее обработки на всем интервале температур эксперимента (750–900 °С). Так, обжиг измельченной руды в смеси (1:1) с гидрокарбонатом натрия (NaHCO_3) показал, что остаточные содержания фосфора и ванадия в кеке после его выщелачивания ($\Delta_{\text{ост}}$) составляют 5,49 и 61,9% от их доли в исходной руде. При этом сам процесс характеризуется следующими значениями постоянной уравнения скорости ($K_{\text{р}}$ и $K_{\text{в}}$): $2,7255 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ ($0,27255 \text{ мс}^{-1}$), $R^2 = 0,7697$ по фосфору и $0,4816 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ ($0,0482 \text{ мс}^{-1}$), $R^2 = 0,7877$ по ванадию, соответственно.

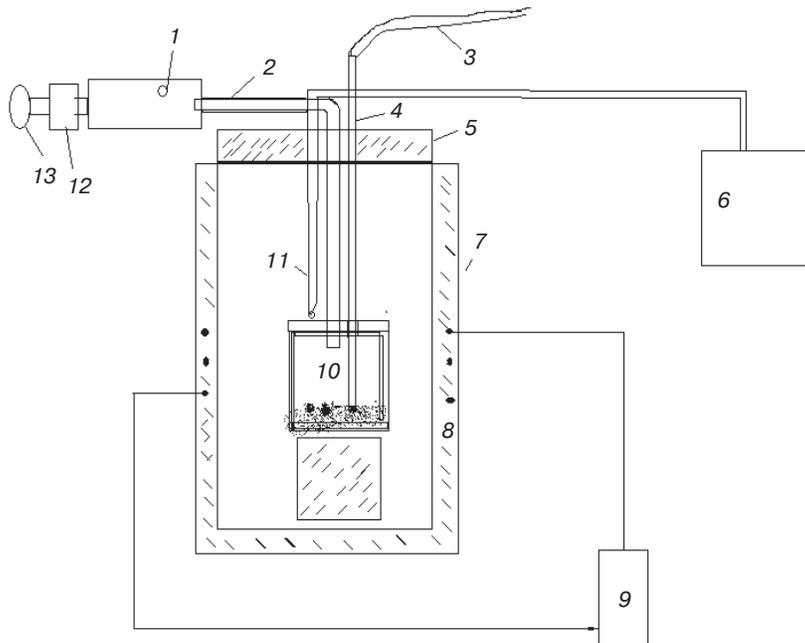


Рис. 1. Установка для обжига руды: 1 — короб с подсосами воздуха для смешения газов из тигля; 2 — стеклянная трубка с теплоизоляцией; 3 — соединительный шланг для подачи газа (Ar) из баллона; 4 — фурма; 5 — огнеупорная крышка печи; 6 — регистрирующий прибор; 7 — печь нагрева; 8 — нагревательный элемент; 9 — трансформатор напряжения; 10 — алундовый тигель; 11 — термопара; 12 — солевой фильтр для очистки газов; 13 — воздушный насос
[Fig. 1. Equipment for ore roasting: 1 — box with air suction for mixing gases from the crucible; 2 — glass tube with thermal insulation; 3 — connecting hose for supplying gas (Ar) from a cylinder; 4 — lance; 5 — fire-resistant furnace cover; 6 — recording device; 7 — heating furnace; 8 — heating element; 9 — voltage transformer; 10 — alundum crucible; 11 — thermocouple; 12 — salt filter for gas purification; 13 — air pump]

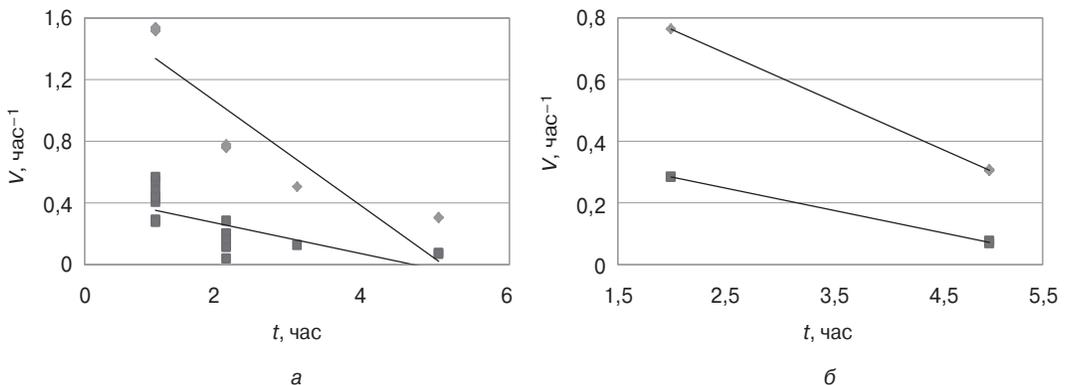


Рис. 2. Скорость обжига руды в смеси с активными добавками (NaHCO_3 , Na_2CO_3 , NaOH и KOH) и кека в атмосфере кислорода воздуха (а) и аргона (б): \blacklozenge — фосфор; \blacksquare — ванадий
[Fig. 2. Rate of roasting of ore mixed with active additives (NaHCO_3 , Na_2CO_3 , NaOH and KOH) and cake in the atmosphere of oxygen (a) and argon (b): \blacklozenge — phosphorus; \blacksquare — vanadium]

Обжиг руды в смеси с карбонатом натрия (Na_2CO_3) в соотношении (1:1) при том же интервале температур показал, что минимальные значения $\Delta_{\text{ост}}$ составляют следующие интервалы, %: по фосфору — 46—87, по ванадию — 71—76. При

этом значения K_f соответственно равны: по фосфору (мс^{-1}) 0,4778 ($R^2 = 0,7179$), по ванадию — 0,5464 ($R^2 = 0,951$). Другой вариант обработки руды — перемешивание с NaOH в соотношении (1:1) и последующий обжиг смеси — позволяют при последующем выщелачивании полученного остатка перевести в раствор, % до 64,5 фосфора и до 42 ванадия и при этом получить следующие значения постоянной скорости процесса: $K_p = 2,4219 \text{ мс}^{-1}$ ($R^2 = 0,9864$), $K_v = 1,0175 \text{ мс}^{-1}$ ($R^2 = 0,8776$). Для случая, когда в качестве разбавителя смеси выступает KOH , взятый в том же соотношении к руде, минимальные значения параметра $\Delta_{\text{ост}}$ по фосфору и ванадию составляют 28 и 57%, соответственно. При этом $K_p = 1,8178 \text{ мс}^{-1}$ ($R^2 = 0,7923$), $K_v = 0,4003 \text{ мс}^{-1}$ ($R^2 = 0,8207$).

Таблица

Кинетика высокотемпературного обжига руды месторождения Томтор
[Kinetics of high-temperature roasting of ore from "Tomtor" field]

Элемент [Element]	Содержание, % [Contents, %]			T, °C	t, ч [hour]	$10^4 \cdot K, \text{ с}^{-1}$		Состав смеси [Mixture composition]			
	начальное [initial]	конечное [final]	$\Delta_{\text{ост}}$			P	V				
P	9,3	1,5	16,13	750	2	2,7255; $R^2 = 0,7697$	0,4816; $R^2 = 0,7877$	Измельченная руда+ NaHCO_3 (1:1) [Crushed ore + NaHCO_3 (1:1)]			
V	0,89	0,7	78,65								
P	9,1	0,75	8,24	800	1						
V	0,9	0,6	66,67								
P	9,2	0,45	4,89	850	1						
V	1,05	0,65	61,9								
P	9,1	0,5	5,49	900	3						
V	1,02	0,7	68,63								
P	9,5	7,15	75,26	750	2				2,4219; $R^2 = 0,9864$	1,0175; $R^2 = 0,8776$	Измельченная руда+ NaOH (1:1) [Crushed ore + NaOH (1:1)]
V	0,94	0,87	92,53								
P	9,3	3,6	38,71	800	1						
V	1,08	0,63	58,33								
P	9,25	3,1	33,51	850	1						
V	0,94	0,61	64,89								
P	9,16	6,7	73,14	900	2						
V	0,97	0,65	67,01								
P	9,5	6,5	68,42	750	2	1,8178; $R^2 = 0,7923$	0,4003; $R^2 = 0,8207$	Измельченная руда+ KOH (1:1) [Crushed ore + KOH (1:1)]			
V	1,01	0,74	73,27								
P	9,3	3,44	36,99	800	1						
V	0,95	0,71	74,74								
P	9,1	2,9	31,87	850	1						
V	0,99	0,64	64,64								
P	9,2	2,56	27,83	900	2						
V	0,97	0,55	56,7								
P	9,3	8,05	86,56	750	2				0,4778; $R^2 = 0,7179$	0,5464; $R^2 = 0,951$	Измельченная Руда + Na_2CO_3 (1:1) [Crushed ore + Na_2CO_3 (1:1)]
V	1,08	0,82	75,93								
P	9,25	6,94	75,03	800	1						
V	0,94	0,68	72,34								
P	9,3	6,6	70,97	850	1						
V	0,89	0,61	68,54								
P	9,1	4,2	46,15	900	2						
V	0,9	0,64	71,11								

Элемент [Element]	Содержание, % [Contents, %]			T, °C	t, ч [hour]	10 ⁴ · K, с ⁻¹		Состав смеси [Mixture composition]
	начальное [initial]	конечное [final]	Δ _{ост}			P	V	
P	9,3	1,5	16,13	750	5	0,4769; R ² = 0,8591	0,9008; R ² = 0,6525	Измельченная руда + NaOH + KOH (1:2,5:2,5) +Ar (0,2 л/мин) [Crushed ore + NaOH + KOH (1:2,5:2,5) + Ar (0,2 l/ min)]
V	1,08	0,25	23,15					
P	9,6	0,8	8,33	800	5			
V	1,05	0,15	14,28					
P	9,5	1,1	11,58	850	2			
V	0,94	0,025	2,65					
P	14,25	2,6	18,24	900	2			
V	1,07	0,21	19,62					

Рассмотрим результаты обжига смеси, составленной из руды и растворителя (NaOH + KOH) в соотношении (1:2,5:2,5), в защитной атмосфере (аргон). Предполагалось, что активное перемешивание газовой среды аргоном при содержании в смеси двух таких активных растворителей, как NaOH и KOH, обеспечит высокую глубину и скорость процесса обжига руды. Однако как показывают полученные данные эксперимента (рис. 2, а), присутствие аргона в атмосфере печи замедляет скорость процесса удаления фосфора ($K_P = 0,4769 \text{ мс}^{-1}$) и ванадия ($K_V = 0,9008 \text{ мс}^{-1}$). Тем не менее, глубина обработки руды методом обжига оказалась достаточно высокой. Так, благодаря лучшему перемешиванию печных газов, которое обеспечивает присутствие аргона, и удлинению времени обжига до 5 ч, минимальные значения $\Delta_{\text{ост}}$ по фосфору и ванадию составляют 8,33 и 2,65%, соответственно. Иными словами, при выщелачивании продукта обжига смеси в раствор перешло до 92% фосфора и 97% ванадия, содержащихся в исходной руде.

Представляло интерес распределение по степени эффективности результатов обжига руды в смеси с различными растворителями. Видно (таблица), что наиболее высокую скорость извлечения фосфора ($K_P = 0,2722 \text{ мс}^{-1}$) демонстрирует высокотемпературная обработка руды в смеси с гидрокарбонатом натрия (NaHCO₃). Второе место по тому же показателю скорости процесса ($K_P = 0,2422 \text{ мс}^{-1}$) занимает обжиг смеси (руда + NaOH). Третье и четвертое места занимает обжиг смеси руды с KOH ($K_P = 0,1818 \text{ мс}^{-1}$) и Na₂CO₃ ($K_P = 0,0478 \text{ мс}^{-1}$). На последнем (пятом) месте стоит обжиг руды в смеси NaOH+KOH с одновременной продувкой аргоном ($K_P = 0,0477 \text{ мс}^{-1}$). По извлечению фосфора при обжиге соответствующий ряд смесей (по растворителю) выглядит следующим образом: NaOH ($K_V = 0,1017 \text{ мс}^{-1}$) → NaOH + KOH ($K_V = 0,0901 \text{ мс}^{-1}$) → Na₂CO₃ ($K_V = 0,0546 \text{ мс}^{-1}$) → NaHCO₃ ($K_V = 0,0482 \text{ мс}^{-1}$) → KOH ($K_V = 0,04 \text{ мс}^{-1}$).

Однако учитывая большой удельный расход гидрокарбоната натрия (1:1), щелочей (NaOH и KOH) в варианте приготовления их смеси в соотношении (1:2,5:2,5) и высокую стоимость реактивов, практическое использование таких вариантов технологии первичной обработки руды с экономической точки зрения видится маловероятным. Опираясь на изложенное и рассматривая представленные варианты с точки зрения их практического применения, на первое место по скорости обжига целесообразно поставить обжиг руды в смеси с NaOH. Обжиг руды в сме-

сях с КОН и Na_2CO_3 выводит обозначенные варианты обработки руды по фосфору на второе и третье места. Соответственно по извлечению ванадия первое место по скорости данного процесса занимает обжиг руды в смеси с NaOH, второе и третье места — за вариантами обжига руды в смеси с Na_2CO_3 , и КОН, соответственно.

В целом, полученные данные по K_p , K_v и $\Delta_{\text{ост}}$ говорят о высокой эффективности операции обжига измельченной руды в смеси с каустической содой и щелочами, поскольку эти операции являются наиболее простыми и недорогими в исполнении. В этой связи сделанный ранее вывод ставит на особое место обжиг руды в атмосфере аргона. Представляется, что его практическое применение будет регулироваться удельным расходом и рыночной стоимостью аргона.

Учитывая изложенное, можно сделать вывод о том, что обжиг руды в присутствии активных добавок показал свою высокую эффективность. При этом:

— обжиг руды в смеси с карбонатами и щелочами позволяет извлекать не менее 95,0% фосфора и 44,0% ванадия, содержащихся в исходном сырье;

— образующийся после обжига руды кек требует дополнительной переработки, поскольку, кроме фосфора и ванадия, содержит другие ценные компоненты (металлы), концентрации которых достаточно высоки.

Выводы

1. Проведены серии лабораторных экспериментов по изучению кинетики высокотемпературного обжига руды в смеси с активными добавками NaHCO_3 , Na_2CO_3 , NaOH и КОН в атмосфере кислорода воздуха, аргона и молекулярного хлора. Установлено, что в атмосфере кислорода воздуха обжиг руды проходит наиболее эффективно с добавками NaHCO_3 , Na_2CO_3 , NaOH, взятыми в соотношении (1:1); применение аргона тормозит этот процесс.

2. Показано, что обжиг руды в смеси с карбонатами и щелочами позволяет переводить в раствор при последующем выщелачивании не менее 95,0% фосфора и 44,0% ванадия, содержащихся в исходной руде. Установлено, что образующийся после обжига руды кек требует дополнительной переработки, поскольку содержит высокие концентрации ванадия и других ценных металлов.

3. Предложено уравнение кинетики обжига руды и рассчитаны значения постоянной скорости (K_i , с^{-1}), где i — компонент руды. Показано, что это уравнение кинетики первого порядка. Установлено, что наибольшей скоростью в атмосфере кислорода воздуха характеризуется обжиг руды в смеси с NaHCO_3 и NaOH. Рассчитаны постоянные скорости этого процесса для фосфора ($K_p = 0,2422 \text{ мс}^{-1}$) и ванадия ($K_v = 0,097 \text{ мс}^{-1}$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Малькова М.Ю., Задиранов А.Н.* Перспективы создания отечественной редкоземельной промышленности / сб. докл. VIII Междунар. науч.-практ. конф. РУДН «Инженерные системы — 2015». М.: Изд-во ИПК РУДН, 2015. С. 500—505.
- [2] *Петухов М.А.* Исследование процесса хлорирования танталито-колумбитового концентрата и создание технологии совместной переработки танталито-колумбитового и лопаритового концентратов: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М., 2010. 26 с.

- [3] Чуб А.В. Гибкие многоцелевые технологии глубокой переработки редкоэлементного сырья хлорным методом: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Соликамск, 1999. 16 с.
- [4] Данилов Ю.Г., Григорьев В.П. Томторское ниобий-редкоземельное месторождение как основная сырьевая база редкометалльной промышленности России / В сб.: Актуальные проблемы, направления и механизмы развития производительных сил Севера — 2016. Материалы Пятого Всеросс. науч. семинара: в 2-х ч. 2016. С. 329—335.
- [5] Пахомов А.А., Чомчоев А.И. Томторское месторождение редкоземельных металлов: варианты освоения / В сб.: Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия. III Международная научно-практическая конференция. 2014. С. 91—97.
- [6] Слепцов А.П., Томашев А.В., Рылов Д.А., Толстов А.В. Новое в методике подсчета запасов комплексных руд месторождения Томтор / В сб.: Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России. Материалы VII Всеросс. науч.-практ. конф., посвященной 60-летию Института геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения РАН. 2017. С. 575—581
- [7] Тарасов А.В., Демидов И.Л. Перспективы освоения Томторского месторождения редкоземельных металлов // Цветная металлургия. 2015. № 4. С. 29—36.
- [8] Литвинова Т.Е. Получение соединений индивидуальных РЗМ и попутной продукции при переработке низкокачественного редкометалльного сырья: дисс. ... д-ра техн. наук. Санкт-Петербург, 2014. 318 с.
- [9] Архангельская В.В., Лагонский Н.Н., Усова Т.Ю., Чистов Л.Б. Руды редкоземельных металлов России // Минеральное сырье. Серия геолого-экономическая. М.: ВИМС, 2006. № 19. 72 с.
- [10] Полякова М.А. Элементный состав редкоземельных руд и его влияние на оценку месторождений: автореф. дисс. ... канд. геол.-минерал. наук. М., 2002. 32 с.
- [11] Нечелюстов Г.Н., Коноплева Е.В., Коноплев А.Д. Минералого-геохимические особенности руд тонкодисперсных редкометалльных руд Томторского месторождения // Минеральное сырье. М.: ВИМС, 1997. № 1. С. 135—149.
- [12] Лапин А.В., Толстов А.В., Куликова И.М. Особенности распределения лантаноидов, иттрия, скандия и тория в уникальных комплексных редкометалльных рудах месторождения Томтор // Геохимия. 2016. № 12. С. 1104—1121.
- [13] Лазарева Е.В., Жмодик С.М., Добрецов Н.Л., Толстов А.В., Щербов Б.Л., Карманов Н.С., Герасимов Е.Ю., Брянская А.В. Главные рудообразующие минералы аномально богатых руд месторождения Томтор (Арктическая Сибирь) // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 6. С. 1080—1115.
- [14] Толстов А.В., Похиленко Н.П., Самсонов Н.Ю., Шепелев Н.В. Новые возможности обогащения и переработки комплексных руд месторождения Томтор / В сб.: Оборудование для обогащения рудных и нерудных материалов. Технологии обогащения. Материалы XII междунар. науч.-практ. конф. 2016. С. 20—31.

©Малькова М.Ю., Задиранов А.Н., 2017

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 18 декабря 2017

Дата принятия к печати: 11 января 2018

Для цитирования:

Малькова М.Ю., Задиранов А.Н. Високотемпературный обжиг руды месторождения ТОМТОР и его особенности // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2018. Т. 19. № 1. С. 92—101. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-92-101

Сведения об авторах:

Малькова Марианна Юрьевна — доктор технических наук, профессор департамента архитектуры и строительства инженерной академии Российского университета дружбы народов. *Область научных интересов:* металлургия черных и цветных металлов, нанотехнологии в металлургии, материаловедение, переработка техногенных отходов. *Контактная информация:* marianna300@yandex.ru

Задиранов Александр Никитич — доктор технических наук, профессор департамента архитектуры и строительства инженерной академии Российского университета дружбы народов. *Область научных интересов:* металлургия черных и цветных металлов, нанотехнологии в металлургии, материаловедение, переработка техногенных отходов, литейное производство. *Контактная информация:* e-mail: zadiranov@mail.ru

A STUDY ON KINETICS OF ROASTING OF ORE FROM TOMTOR FIELD

M.Yu. Malkova, A.H. Zadiranov

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)
6, Miklukho-Maklaya str., Moscow, 117198, Russian Federation

Research on kinetics of change of phosphorus, niobium, vanadium and titanium content during high-temperature roasting of ore from Tomtor field mixed with active additives: bicarbonate (NaHCO_3), sodium carbonate (Na_2CO_3), alkalis (KOH , NaOH) is conducted. An equation of ore roasting kinetics is proposed and values of constant rate of high-temperature ore roasting for phosphorus, niobium, vanadium and the titanium under various conditions are calculated. Relationships of constant rate of high-temperature ore roasting in the atmosphere of air oxygen, argon and molecular chlorine to the temperature of roasting and content of active additives are obtained. It is established that in the atmosphere of air oxygen, ore roasting is most effective with additions of NaHCO_3 , Na_2CO_3 , NaOH , taken with the ratio (1:1). It is shown that roasting of ore in admixture with carbonates and alkalis can translate into a solution for subsequent leaching at minimum 95.0% of phosphorus and 44.0% of vanadium contained in the original ore. It is established that the greatest rate of roasting in the atmosphere of oxygen is characterized by ore roasting in a mixture of NaHCO_3 and NaOH . The constant rates of that process for phosphorus and vanadium are calculated. It is established that filter cake forming after ore roasting requires further processing because it contains high concentrations of vanadium and other valuable metals.

Key words: ore of Tomtor field, cake, niobium, vanadium, titanium, phosphorus, roasting, kinetics, rare earth metals

REFERENCES

- [1] Mal'kova M.Yu., Zadiranov A.N. Perspektivy sozdaniya otechestvennoi redkozemel'noi promyshlennosti [Prospects for creation of domestic rare-earth industry]. Collection of reports of the VIII International Scientific-Practical Conference of RUDN "Engineering systems — 2015". M.: RUDN Publishing, 2015. P. 500—505. (In Russ.).
- [2] Petukhov M.A. Issledovanie protsessa khlorirovaniya tantalito-kolumbitovogo kontsentrata i sozдание tekhnologii sovmestnoi pererabotki tantalito-kolumbitovogo i loparitovogo kontsetratov [A study of the chlorination process of tantalite-columbite concentrate and creation of technology

- of joint processing of tantalite-columbite and loparite concentrates]: thesis abstract... Cand. Tech. Sc. Moscow, 2010. 26 p. (In Russ.).
- [3] Chub A.V. *Gibkie mnogotselevye tekhnologii glubokoi pererabotki redkoelementnogo syr'ya khlornym metodom* [Flexible, multi-purpose technologies of deep processing of rare element raw materials by chlorine method]: thesis abstract... Cand. Tech. Sc. Solikamsk, 1999. 16 p. (In Russ.).
- [4] Danilov Yu.G., Grigor'ev V.P. *Tomtorskoe niobii-redkozemel'noe mestorozhdenie kak osnovnaya syr'evaya baza redkometal'noi promyshlennosti Rossii* [Tomtor niobium-rare earth deposit as the main raw material base of the rare metal industry in Russia]. In the collection: Actual problems, directions and mechanisms of development of productive forces of the North — 2016. Materials of the Fifth all-Russian Scientific Seminar: in 2 parts. 2016. P. 329—335. (In Russ.).
- [5] Pakhomov A.A., Chomchoev A.I. *Tomtorskoe mestorozhdenie redkozemel'nykh metallov: varianty osvoeniya* [Tomtor field deposit of rare earth metals: alternatives of development]. In the collection: Scientific perspectives of the XXI century. Achievements and prospects of the new century. III International Scientific and Practical Conference. 2014. P. 91—97. (In Russ.).
- [6] Sleptsov A.P., Tomashev A.V., Rylov D.A., Tolstov A.V. *Novoe v metodike podscheta zapasov kompleksnykh rud mestorozhdeniya Tomtor* [A new method of calculation of reserves in the "Tomtor" field complex ore deposits]. In the collection: Geology and mineral resources of North-East Russia, Materials of the VII all-Russian Scientific-Practical Conference dedicated to the 60th anniversary of the Institute of Geology of Diamond and Noble Metals, Siberian branch of the Russian Academy of Sciences. 2017. P. 575—581. (In Russ.).
- [7] Tarasov A.V., Demidov I.L. *Perspektivy osvoeniya Tomtorskogo mestorozhdeniya redkozemel'nykh metallov* [Prospects of development of the Tomtor field deposits of rare-earth metals]. *Non-Ferrous Metallurgy*. 2015. No. 4. P. 29—36. (In Russ.).
- [8] Litvinova T.E. *Poluchenie soedinenii individual'nykh RZM i poputnoi produktsii pri pererabotke nizkokachestvennogo redkometal'nogo syr'ya* [Obtaining individual compounds of rare earth metals and by-products in the processing of rare metal raw materials of low quality]. *Diss. ... Doctor. Tech. Sc. St. Petersburg*, 2014. 318 p. (In Russ.).
- [9] Arkhangel'skaya V.V., Lagonskii N.N., Usova T.Yu., Chistov L.B. *Rudy redkozemel'nykh metallov Rossii* [Ores of rare earth metals in Russia] // *Mineral'noe syr'e. Seriya geologo-ekonomicheskaya*. Moscow: VIMS publ., 2006. No. 19. 72 p. (In Russ.).
- [10] Polyakova M.A. *Elementnyi sostav redkozemel'nykh rud i ego vliyanie na otsenku mestorozhdenii* [Elemental composition of rare-earth ores and its influence on deposits allocation]: thesis abstract. ... Cand. Geol. Min. Sc. Moscow: IMGRE publ., 2002. 32 p. (In Russ.).
- [11] Nechelyustov G.N., Konopleva E.V., Konoplev A.D. *Mineralogo-geokhimicheskie osobennosti rud tonkodispersnykh redkometal'nykh rud Tomtorskogo mestorozhdeniya* [Mineralogical-geochemical features of fine rare-metal ores of Tomtor field deposit]. *Mineral'noe syr'e*. Moscow: VIMS publ., 1997. No. 1. P. 135—149. (In Russ.).
- [12] Lapin A.V., Tolstov A.V., Kulikova I.M. *Distribution of REE, Y, Sc, and Th in the unique complex rare-metal ores of the Tomtor deposit*. *Geochemistry International*. 2016. No. 12. P. 1104—1121. (In Russ.).
- [13] Lazareva E.V., Zhmodik S.M., Dobretsov N.L., Tolstov A.V., Shcherbov B.L., Karmanov N.S., Gerasimov E.Yu., Bryanskaya A.V. *Major minerals of abnormally high-grade ores of the Tomtor deposit (Arctic Siberia)*. *Russian Geology and Geophysics*. 2015. Vol. 56. No. 6. P. 1080—1115. (In Russ.).
- [14] Tolstov A.V., Pokhilenko N.P., Samsonov N.Yu., Shepelev N.V. *Novye vozmozhnosti obogashcheniya i pererabotki kompleksnykh rud mestorozhdeniya Tomtor* [New opportunities of enrichment and processing of complex ores of Tomtor]. In the collection: Equipment for enrichment of ore and nonmetallic materials. Enrichment technologies. Proceedings of the XII international scientific and practical conference. 2016. No. 12. P. 1104—1121. (In Russ.).

Article history:

Received: December 18, 2017

Accepted: January 11, 2018

For citation:

Malkova M.Yu., Zadiranov A.N. A study on kinetics of roasting of ore from tomtor field. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 2018, 19(1). 92—101. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-92-101

Bio Note:

Marianna Yu. Malkova — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Architecture and Construction, Peoples' Friendship University of Russia. *Scientific interests*: metallurgy of ferrous and non-ferrous metals, nanotechnology in metallurgy, materials science, recycling of industrial waste. *Contact information*: e-mail: marianna300@yandex.ru

Alexandr N. Zadiranov — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Architecture and Construction, Peoples' Friendship University of Russia. *Scientific interests*: metallurgy of ferrous and non-ferrous metals, nanotechnology in metallurgy, materials science, recycling of industrial waste, foundry. *Contact information*: e-mail: zadiranov@mail.ru