

**К.К. РАЗМАХНИН**, канд. техн. наук,

**А.Н. ХАТЬКОВА**, д-р техн. наук, **В.Н. ЕМЕЛЬЯНОВ**

(Россия, Чита, ФГБОУ ВПО Забайкальский государственный университет)

## **ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТНОЙ СЕПАРАЦИИ ПРИ ОБОГАЩЕНИИ ЦЕОЛИТСОДЕРЖАЩИХ ПОРОД ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ**

Цеолитсодержащие породы (ЦСП) месторождений Восточного Забайкалья (Шивыртуйское, Талан-Гозагорское) имеют ряд общих технологико-минералогических свойств, определяющих возможность применения при их переработке одинаковых методов обогащения. К таким свойствам можно отнести: неравномерное распределение цеолитов (12-56%), присутствие железосодержащих примесей, часто тонкозернистое взаимопроращение цеолита с монтмориллонитом, присутствие в качестве основных примесей минералов кварца, полевого шпата и монтмориллонита [1].

Анализ физических свойств основных вмещающих минералов цеолитсодержащих пород с позиции разделительных признаков позволяет заключить, что для наиболее эффективного извлечения вредных вмещающих примесей требуются комбинированные технологические схемы, включающие кроме методов рудоподготовки, магнитную и электростатическую сепарацию, а также методы энергетического воздействия на вещество.

Одним из основных видов примесей в цеолитсодержащих породах являются оксиды железа ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ), их содержание колеблется от 2,14-4,15% (в ЦСП Шивыртуйского месторождения) до 11,72% (в шабазитсодержащих андезитобазальтах Талан-Гозагорского месторождения), а содержание оксидов железа в растворе при кислотной переработке ЦСП Шивыртуйского месторождения варьируется от 2,8 до 8,2%, что является достаточно высоким значением [1, 2].

Такое содержание железа существенно снижает качество цеолитовых товарных продуктов. В этой связи возникает необходимость предварительного обогащения, целью которого является удаление железосодержащих примесей из ЦСП. Наиболее эффективным способом удаления железосодержащих примесей, как известно, является магнитная сепарация, поэтому дальнейшим направлением исследований явилось изучение эффективности применения этого метода обогащения при переработке цеолитсодержащих пород.

Следует также отметить, что большое влияние на качество товарных цеолитовых продуктов, как уже указывалось, оказывают и другие примеси: минералы кварца, полевого шпата и монтмориллонита, а также органика. Поэтому в дальнейших исследованиях, помимо изучения процесса эффективного удаления железосодержащих примесей, уделялось внимание и возможности максимального извлечения всех вредных примесей из цеолитсодержащих пород.

Так как минералы железа и другие вредные примеси в цеолитсодержащих породах зачастую являются вкрапленными и их раскрытие с помощью дробле-

## **Магнітна і електрична сепарація**

ния и измельчения не всегда возможно, то рациональным в этом случае становится использование энергетических, физико-химических и химических, а также термических методов воздействия, позволяющих достичь необходимой степени дезинтеграции и разупрочнения.

Наиболее эффективными современными методами воздействия на минеральное сырье с целью дезинтеграции являются: ультразвуковая обработка, мощные магнитные электроимпульсные воздействия, обработка ускоренными электронами, а также обжиг [1, 3].

Авторами данной работы исследована возможность применения ультразвуковой обработки, обработки ускоренными электронами, и обжига ЦСП с целью интенсификации процесса их магнитной сепарации.

Магнитная сепарация ЦСП после предварительного дробления и измельчения, а также после соответствующего вида воздействия проводилась на лабораторном электромагнитном сепараторе марки 138-ТСЭ, а класс крупностью менее 0,1 мм обогащался на сепараторе СИМ-1.

Результаты магнитной сепарации ЦСП представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Результаты магнитной сепарации ЦСП крупностью 0,1-2 мм

Месторождение	Класс крупности, мм	Ср. содержание примесей железа в исх. материале, %	Содержание цеолитов в продукте, %	Содержание примесей железа в цеолитовом продукте, %	Содержание иных примесей, %
После ультразвуковой обработки					
Шивыртуйское	-2+1	3,14	72,30	2,93	24,77
	-1+0,5		83,10	2,21	14,69
	-0,5+0,3		85,70	1,98	19,32
	-0,3+0,1		88,90	1,81	9,73
Талан-Гозагорское	-2+1	11,2	69,10	4,12	20,78
	-1+0,5		75,20	3,74	21,06
	-0,5+0,3		83,70	3,21	13,09
	-0,3+0,1		88,60	2,09	9,31
После обжига					
Шивыртуйское	-2+1	3,14	72,40	2,0	25,60
	-1+0,5		83,50	1,19	15,31
	-0,5+0,3		85,30	0,92	13,78
	-0,3+0,1		88,70	0,55	10,75
Талан-Гозагорское	-2+1	11,2	70,00	8,09	21,91
	-1+0,5		74,80	3,25	21,95
	-0,5+0,3		83,90	1,00	15,10
	-0,3+0,1		88,90	0,08	11,02
После обработки ускоренными электронами					
Шивыртуйское	-2+1	3,14	73,50	1,78	24,72
	-1+0,5		84,20	1,11	14,69
	-0,5+0,3		85,90	0,88	13,22
	-0,3+0,1		88,90	0,36	10,74
Талан-Гозагорское	-2+1	11,2	70,10	8,17	21,73
	-1+0,5		75,20	3,74	21,06
	-0,5+0,3		84,90	1,08	14,02
	-0,3+0,1		89,60	0,12	10,28

## Магнітна і електрична сепарація

Таблиця 2

Результаты магнитной сепарации тонкодисперсных ЦСП  
на электромагнитном изодинамическом сепараторе СИМ-1

Сырье	Напряжен. магн. поля H, кА/м	Уд. магн. сила в изодин. зоне, Н/сек <sup>2</sup>	Ширина изодин. зоны	Сила тока, А	Класс крупн., мм	Извлеч. примесей Fe, в магн. продукте, %	Масс. доля Fe в магн. прод.
1	2	3	4	5	6	7	8
После ультразвуковой обработки							
ЦСП Шивыртуйско- го месторождения	600	0,0091	7,0	0,50	-0,1	89,9	92,2
					+0,074		
	950	0,0103	7,5	1,0	-0,1	92,1	94,7
					+0,074		
	1450	0,0153	8,0	1,57	-0,1	94,5	95,6
					+0,074		
					-0,074	98,8	96,2
					+0,05		
ЦСП Талан- Гозагорского место- рождения	600	0,0091	7,0	0,50	-0,1	98,5	95,1
					+0,074		
	950	0,0103	7,5	1,0	-0,1	98,2	96,0
					+0,074		
	1450	0,0153	8,0	1,57	-0,1	98,3	96,4
					+0,074		
					-0,074	99,3	97,7
					+0,05		
После обжига							
ЦСП Шивыртуйско- го месторождения	600	0,0091	7,0	0,50	-0,1	89,5	92,3
					+0,074		
	950	0,0103	7,5	1,0	-0,1	93,8	95,9
					+0,074		
	1450	0,0153	8,0	1,57	-0,1	95,8	97,1
					+0,074		
					-0,074	98,6	97,4
					+0,05		

## Магнітна і електрична сепарація

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	
ЦСП Талан-Гозагорского месторождения	600	0,0091	7,0	0,50	-0,1	98,9	96,7	
					+0,074			
					-0,074			
	950	0,0103	7,5	1,0	1,0	+0,05	99,2	96,9
						-0,1		
						+0,074		
	1450	0,0153	8,0	1,57	1,57	-0,1	99,0	97,1
						+0,074		
						-0,074		
1450	0,0153	8,0	1,57	1,57	+0,05	99,3	98,4	
					-0,1			
					+0,074			
После обработки ускоренными электронами								
Цеолитсодержащие породы Шивыртуйского месторождения	600	0,0091	7,0	0,50	-0,1	89,7	92,4	
					+0,074			
					-0,074			
	950	0,0103	7,5	1,0	1,0	+0,05	96,4	94,4
						-0,1		
						+0,074		
	1450	0,0153	8,0	1,57	1,57	-0,1	93,3	95,6
						+0,074		
						-0,074		
1450	0,0153	8,0	1,57	1,57	+0,05	97,9	96,2	
					-0,1			
					+0,074			
Шабазитсодержащие андезитобазальты Талан-Гозагорского месторождения	600	0,0091	7,0	0,50	-0,1	98,7	96,3	
					+0,074			
					-0,074			
	950	0,0103	7,5	1,0	1,0	+0,05	99,1	96,8
						-0,1		
						+0,074		
	1450	0,0153	8,0	1,57	1,57	-0,1	98,5	96,2
						+0,074		
						-0,074		
1450	0,0153	8,0	1,57	1,57	+0,05	99,2	98,1	
					-0,1			
					+0,074			
1450	0,0153	8,0	1,57	1,57	-0,1	98,3	97,4	
					+0,074			
					-0,074			
1450	0,0153	8,0	1,57	1,57	+0,05	99,6	98,7	
					-0,1			
					+0,074			

Из приведенных в таблице 2 данных видно, что электромагнитная сепарация в изодинамическом поле тонкодисперсных ЦСП является эффективным методом очистки от примесей железа, позволяющим понизить их содержание в классе 0,1-0,05 мм до 0,9-1,1%.

Наиболее приемлемой для обогащения ЦСП оказалась электромагнитная сепарация для класса -0,3+0,5 мм, при этом получен продукт с содержанием цеолита 88,6-88,9%.

Следует отметить, что наибольший эффект применения был достигнут при обогащении шабазитсодержащих андезитобазальтов Талан-Гозагорского ме-

## Магнітна і електрична сепарація

сторождения, что обусловлено большими различиями в магнитной восприимчивости шабазита и породообразующих минералов – пироксена, оливина и других. С помощью сухой электромагнитной сепарации фракций крупностью  $-0,2+0,05$  мм получены концентраты с содержанием шабазита 95-98%. Общее извлечение шабазита составило порядка 70%. Химический состав выделенного концентрата представлен в табл. 3.

Таблица 3

Химический состав шабазитового продукта	
Элемент	Массовая доля, %
SiO <sub>2</sub>	51,47
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,17
CaO	7,83
MgO	0,95
BaO	0,16
Na <sub>2</sub> O	0,32
K <sub>2</sub> O	0,38
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,36
MnO	0,03
TiO	0,04
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,03

Анализ рентгенограмм ЦСП, полученных до и после магнитной сепарации показывает, что процесс удаления железосодержащих примесей идет достаточно эффективно, это подтверждается и проведенными экспериментальными исследованиями. Следовательно, магнитная сепарация может применяться при переработке ЦСП, как операция для удаления основной массы железосодержащих примесей.

После магнитной сепарации немагнитная фракция подвергалась электростатической сепарации на лабораторном электростатическом сепараторе, где производилось удаление примесей кварца, слюды и полевых шпатов при напряженности поля  $(2,7-4,0) \cdot 10^{-5}$  В/м. Результаты электростатической сепарации клиноптилолит-цеолитсодержащих пород Шивыртуйского и шабазитсодержащих андезитобазальтов Талан-Гозагорского месторождений представлены в табл. 4.

Для наиболее полного извлечения полевых шпатов и кварца из тонкодисперсного немагнитного продукта крупностью менее 0,074 мм перед электростатической сепарацией проводилась подогрев-электризация в присутствии салициловой или бензойной кислоты с концентрацией  $(0,2-0,4) \cdot 10^{-3}$  кг/см<sup>3</sup>. При нагревании до 80-100 °С происходит возгонка салициловой кислоты (бензойной – при 45-50 °С), адсорбция продуктов возгонки (объемных зарядов одного знака – анионов кислотного остатка) поверхностью полевых шпатов и кварца. Заряженные, таким образом, частицы полевых шпатов и кварца, движутся к электроду, имеющему положительный потенциал, и осаждаются на нем. Таким образом, происходит отделение полевых шпатов и кварца от цеолитового минерала электростатической сепарацией, которую проводят при напряженности поля

## **Магнітна і електрична сепарація**

$(2,7-4,0) \cdot 10^{-5}$  В/м. Результаты электростатической сепарации тонкодисперсных клиноптилолит-цеолитсодержащих пород Шивыртуйского и шабазитсодержащих андезитобазальтов Талан-Гозагорского месторождений представлены в табл. 5.

Таблица 4

Результаты электростатической ЦСП Шивыртуйского и Талан-Гозагорского месторождений крупностью 0,1-2 мм

Месторождение	Класс крупности, мм	Выход, %	
		Цеолитовый продукт	Непроводящая фракция
После ультразвуковой обработки			
Шивыртуйское	-2+1	81,55	18,45
	-1+0,5	91,38	8,62
	-0,5+0,3	95,60	4,40
	-0,3+0,1	96,70	3,30
Талан-Гозагорское	-2+1	78,20	21,80
	-1+0,5	85,70	14,30
	-0,5+0,3	91,80	8,20
	-0,3+0,1	96,55	3,45
После обжига			
Шивыртуйское	-2+1	80,75	19,25
	-1+0,5	91,10	8,90
	-0,5+0,3	94,95	5,05
	-0,3+0,1	96,33	3,67
Талан-Гозагорское	-2+1	79,14	20,86
	-1+0,5	86,23	13,77
	-0,5+0,3	92,55	7,45
	-0,3+0,1	96,70	3,30
После обработки ускоренными электронами			
Шивыртуйское	-2+1	80,55	19,45
	-1+0,5	91,17	8,83
	-0,5+0,3	95,10	4,90
	-0,3+0,1	96,28	3,72
Талан-Гозагорское	-2+1	77,85	22,15
	-1+0,5	84,53	15,47
	-0,5+0,3	90,21	9,79
	-0,3+0,1	95,37	4,63

Из представленных в таблице 5 данных видно, что применение электростатической сепарации является достаточно эффективным методом удаления из ЦСП минералов кварца и полевых шпатов, а использование салициловой кислоты для контрастного заряжения поверхности минералов в течение 30-60 мин обеспечивает более эффективное отделение указанных примесей из материала крупностью  $-0,074+0,05$  мм.

## Магнітна і електрична сепарація

Таблиця 5

Результаты электростатической сепарации тонкодисперсных  
ЦСП Шивыртуйского и Талан-Гозагорского месторождений

Месторождение	Класс крупности, мм	Выход, %		
		Цеолитовый продукт	Непроводящая фракция	Содержание мономинералов цеолита в цеолитовом продукте, %
После ультразвуковой обработки				
Шивыртуйское	-1+0,5	90,22	9,78	98,90
	-0,5+0,074	91,70	8,30	99,01
	-0,074+0,05	93,20	6,80	99,80
Талан- Гозагорское	-1+0,5	80,20	16,06	99,01
	-0,5+0,074	92,70	8,21	99,25
	-0,074+0,05	95,60	4,40	99,87
После обжига				
Шивыртуйское	-1+0,5	91,08	8,92	98,95
	-0,5+0,074	92,15	7,85	99,12
	-0,074+0,05	93,05	6,95	99,80
Талан- Гозагорское	-1+0,5	81,22	18,78	99,09
	-0,5+0,074	90,09	9,91	99,26
	-0,074+0,05	96,00	4,00	99,88
После обработки ускоренными электронами				
Шивыртуйское	-1+0,5	90,74	9,26	98,02
	-0,5+0,074	91,34	8,66	98,46
	-0,074+0,05	93,31	6,69	99,15
Талан- Гозагорское	-1+0,5	80,45	19,55	98,22
	-0,5+0,074	90,85	9,15	98,61
	-0,074+0,05	95,64	4,36	99,05

В результате проведенных исследований установлено, что глубокая очистка ЦСП от примесей железа, а также очистка пор цеолитов от содержащегося в них значительного количества органики, существенно снижающей их сорбционную емкость, а также являющейся источником загрязнения при использовании ЦСП в различных отраслях народного хозяйства, может быть достигнута посредством применения ультразвукового воздействия (или обжига, или обработки ускоренными электронами) на цеолитовое сырье, а также с применением магнитной и электростатической сепарации.

### Список литературы

1. Хатькова А.Н. Минералого-технологическая оценка цеолитсодержащих пород Восточного Забайкалья. – Чита: ЧитГУ, 2006. – 243 с.
2. Размахнин К.К. Сырьевая база и технологии переработки цеолитсодержащих пород Восточного Забайкалья // Минеральные ресурсы. Экономика и управление. – 2011. – №1. – С. 7-10.
3. Влияние воздействия ускоренными электронами на цеолитсодержащие породы Восточного Забайкалья. / А.Н. Хатькова, В.И. Ростовцев, К.К. Размахнин и др. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2013. – № 6. – С. 167-174.

© Размахнин К.К., Хатькова А.Н., Емельянов В.Н., 2014

*Надійшла до редколегії 13.01.2014 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим*