

УДК 622.363.2:622.765

Ф. Ф. Можейко, чл.-кор. (ИОНХ НАН Беларуси);  
Т. Г. Рудаковская, канд. хим. наук (ИОНХ НАН Беларуси);  
И. Б. Жданович, канд. хим. наук (ИОНХ НАН Беларуси);  
В. В. Шевчук, д-р хим. наук (ИОНХ НАН Беларуси)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВКРАПЛЕННОСТИ СОЛЕВЫХ МИНЕРАЛОВ В КАЛИЙНОЙ РУДЕ 4-ГО ШАХТНОГО ПОЛЯ СТАРОБИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Исследовано обогащение калийной руды различной степени измельчения 4-го шахтного поля Старобинского месторождения путем разделения по плотности в тяжелых жидкостях. Показано, что высокая степень раскрытия сростков основных и сопутствующих минералов достигается в результате измельчения руды до размера частиц менее 1,0 мм. Концентраты, получаемые для фракций с крупностью зерен менее 1,0 мм, характеризуются высоким содержанием хлористого калия.

The dressability of Starobinsk fourth pit potassium ore difference reduction ratio by separation in heavy media was studied. It was shown that high degree opening aggregates basic and associated minerals has been achieved in result of ore milling to size smaller than 1,0 mm. Flotation concentrates for fraction with grain size smaller than 1,0 mm are characterized by high content chloride potassium.

**Введение.** Республика Беларусь по производству и экспорту калийных удобрений занимает одно из ведущих мест в мире. Постоянно возрастающие потребности в калийных удобрениях вызывают острую необходимость непрерывного увеличения их производства, которое может быть достигнуто за счет освоения Восточного блока Старобинского месторождения сильвинитовых руд с 4-м шахтным полем и расположенного восточнее его Нежинского участка. Целесообразно организовать на 4-м шахтном поле производство калийных удобрений по флотационному методу, который не требует огромных капиталовложений и теплотехнических затрат.

Известно [1], что эффективность флотационного обогащения минеральных ископаемых в основном определяется степенью раскрытия рудообразующих минералов при дроблении и измельчении руды до необходимой крупности. В связи с этим изучение структурных и текстурных особенностей сильвинитовой руды 4-го шахтного поля Старобинского месторождения и сравнение их с рудами 1–3-го полей, обогащаемых флотационным методом, позволит установить необходимую степень раскрытия минералов галита ( $\text{NaCl}$ ), сильвина ( $\text{KCl}$ ) и нерастворимого в воде остатка (н. о.), оптимальный гранулометрический состав измельченной руды, а также предопределить возможные качественно-количественные результаты обогащения ее методом флотации.

**Основная часть.** При исследовании возможности обогащения флотационным методом сильвинитовой руды 4-го шахтного поля необходимо было определить оптимальную степень измельчения руды, обеспечивающую максимальное раскрытие зерен сильвина, галита и нерастворимых в воде глинисто-карбонатных пород (н. о.).

Степень раскрытия руды определяется, с одной стороны, природными текстурно-структурными особенностями и минералогическим составом породы, с другой – схемой и режимом измельчения. Переизмельчение руды приводит к образованию значительного числа тонких солевых и глинистых частиц, снижающих селективность флотационного процесса, качество минеральных удобрений и степень извлечения полезного компонента вследствие увеличения потерь  $\text{KCl}$  при обесшламливании и обезвоживании. Слишком крупные частицы также плохо флотируются и вызывают потери  $\text{KCl}$  с хвостами флотации, что связано с существованием предельного размера частиц, выше которого они не способны удерживаться на пузырьках воздуха при флотации. Необходима оптимизация гранулометрического состава питания флотации с целью снижения содержания как очень тонких (меньше 0,1 мм), так и крупных частиц.

Изучены химический и гранулометрический составы руд двух горизонтов 4-го шахтного поля и показано, что они, согласно классификации [2], относятся к относительно некрепким – «мягким» рудам и уже при дроблении до размера –5 мм почти половина руды переходит в достаточно мелкие частицы, крупность которых позволяет обогащать их флотационным методом. По данным гранулометрического состава руды 3-го горизонта в отличие от руд 2-го горизонта характеризуются более высоким содержанием крупных частиц, что свидетельствует о большей прочности соляных пород этого горизонта (таблица). Высокая прочность сильвинитов обусловлена наличием внутри зерен руды тонкодисперсных частиц сильвина и галита, прочно сросшихся друг с другом, что подтверждают и микроскопические исследования (рис. 1, б).

**Гранулометрический и химический составы руды 2-го и 3-го горизонтов 4-го шахтного поля  
по классам крупности при измельчении менее 5 мм**

Класс крупности, мм	Выход класса, %	Содержание КС1 в классе, %	Извлечение КС1 в класс, % от руды	Содержание NaCl в классе, %	Извлечение NaCl в класс, % от руды
<b>2-й горизонт</b>					
-5+3	9,56	15,87	7,53	76,57	9,77
-3+1,6	14,87	17,16	12,66	76,66	15,21
-1,6+1	23,01	19,19	21,91	76,97	23,63
-1+0,8	7,46	20,00	7,42	76,15	7,58
-0,8+0,5	10,57	22,60	11,87	73,54	10,37
-0,5+0,25	13,67	24,30	16,48	72,42	13,21
-0,25+0	20,86	21,38	22,13	72,68	20,23
<b>3-й горизонт</b>					
-5+3	21,74	28,40	21,62	61,74	20,81
-3+1,6	13,49	25,50	12,06	67,03	14,02
-1,6+1	13,50	25,80	12,20	68,08	14,25
-1+0,8	6,46	27,00	6,10	67,40	6,75
-0,8+0,5	9,82	29,70	10,22	65,09	9,91
-0,5+0,25	13,60	33,10	15,77	61,94	13,06
-0,25+0	21,39	29,40	22,04	63,93	21,20

Установлено, что по распределению хлористого калия в различных фракциях крупности наблюдается следующая зависимость: с уменьшением размера частиц руды (за исключением фракции  $-0,25+0$  мм) количество КС1 в них возрастает. При этом руды 3-го горизонта характеризуются более высоким содержанием КС1 в классах крупности, что говорит о более полном раскрытии сростков сильвина и галита при измельчении руды этого горизонта. Микроструктуру сильвинитовой руды двух ныне эксплуатируемых горизонтов 4-го шахтного поля, а также продуктов их обогащения, выделенных в тяжелых жидкостях (концентрат и хвосты), изучали с по-

мощью микроскопа марки «Телемик-1» (Россия – Япония).

На рис. 1 представлены микрофотографии образцов исходной руды 2-го (а) и 3-го (б) горизонтов различной крупности. Как видим, для указанных руд характерна полосчатая микротекстура, обусловленная наличием различных по структуре полос. Отмечается присутствие в прослоях руд первичных и вторичных структур, взаимное проращивание основных породообразующих и сопутствующих минералов друг в друге, наличие сростков в разных комбинациях: как между солевыми минералами, так и между различными нерастворимыми в воде глинисто-карбонатными породами.



Рис. 1. Микрофотографии образцов сильвинитовой руды 2-го (а) и 3-го (б) горизонтов 4-го шахтного поля

Необходимо отметить высокую вкрапленность сильвина и галита в галопелитовые прослойки и, наоборот, включения глинисто-карбонатных пород в зернах соляных минералов в виде тесных взаимных прорастаний в различных микровключениях мелких размеров (от 0,01 до 0,2–1,0 мм). При этом руды 3-го горизонта имеют более тонкую вкрапленность, чем руды 2-го горизонта, что предопределяет различный характер их обогащения. В виде примесей присутствуют микрозернистый глинисто-ангидритовый материал и карбонаты.

Подготовку калийной руды к флотационному обогащению осуществляют путем среднего и мелкого дробления и измельчения, оттирки (диспергации) глины и обесшламливания. Основная задача подготовительных операций в технологии обогащения калийных руд – максимально полное раскрытие руды при минимальном обесшламливании.

Наиболее четкие сведения о характере раскрытия зерен сильвинитовой руды дают результаты фракционного анализа тяжелой жидкости различной плотности. Фракционный анализ выполнен с использованием органических жидкостей. В качестве тяжелой жидкости применен бромформ с плотностью 2,89 г·см<sup>-3</sup>. В качестве легкого разбавителя выбран толуол (0,866 г·см<sup>-3</sup>).

Плотность химически чистого хлорида калия составляет 1,99 г·см<sup>-3</sup>, хлорида натрия – 2,17 г·см<sup>-3</sup>. Тяжелые жидкости с плотностями 2,00; 2,04; 2,08; 2,12 и 2,16 г·см<sup>-3</sup> получали путем смешения бромформа с толуолом в определенных пропорциях.

По количеству материала, всплывшего в жидкости с плотностью 2,00 г·см<sup>-3</sup>, можно судить о количестве полностью раскрытых частиц сильвина, наличии в них различных примесей, а также о максимально возможном содер-

жании КС1 в концентрате, который может быть получен флотационным способом без применения его дополнительного выщелачивания свежей водой. И наоборот, по количеству материала, потонувшего в жидкости с плотностью 2,16 г·см<sup>-3</sup>, можно судить о содержании полностью раскрытых частиц галита (исключая их сростки с галопелитовым материалом) и возможных потерях КС1 с хвостами флотации. Количество же материала, всплывшего в промежуточных фракциях (–2,16+2,00 г·см<sup>-3</sup>), дает обширную информацию для технологов. Масса этих фракций позволяет сделать вывод о степени раскрытия галита и сильвина, о необходимой крупности измельчения руды, при которой получается минимальный выход сростков, а также оценить эффективность флотационных перешисток и выбрать флотационную схему обогащения [3, 4].

По результатам фракционного анализа построены кривые разделения руды, характеризующие извлечение КС1 в концентрат в зависимости от удельного веса тяжелой жидкости для различных классов крупности (рис. 2, а, б); параллельно определено содержание КС1 в концентрате по фракциям плотности. Установлено, что с увеличением тонкости помола калийной руды качественно-количественные показатели ее разделения в тяжелых жидкостях улучшаются и уже при измельчении руды до крупности менее 1,0 мм преобладающая часть сростков сильвина с галитом практически полностью раскрывается. Концентраты, получаемые для фракций – 1,0+0,25 мм; –0,8+0,25 мм; –0,5+0,25 мм характеризуются высоким содержанием КС1: 95,7, 95,8, 96,1% (2-й горизонт) и 95,1, 95,3, 95,5% (3-й горизонт) соответственно. При этом руда 2-го горизонта содержит значительно меньше сростков, всплывающих в промежуточных фракциях, чем руда 3-го горизонта.

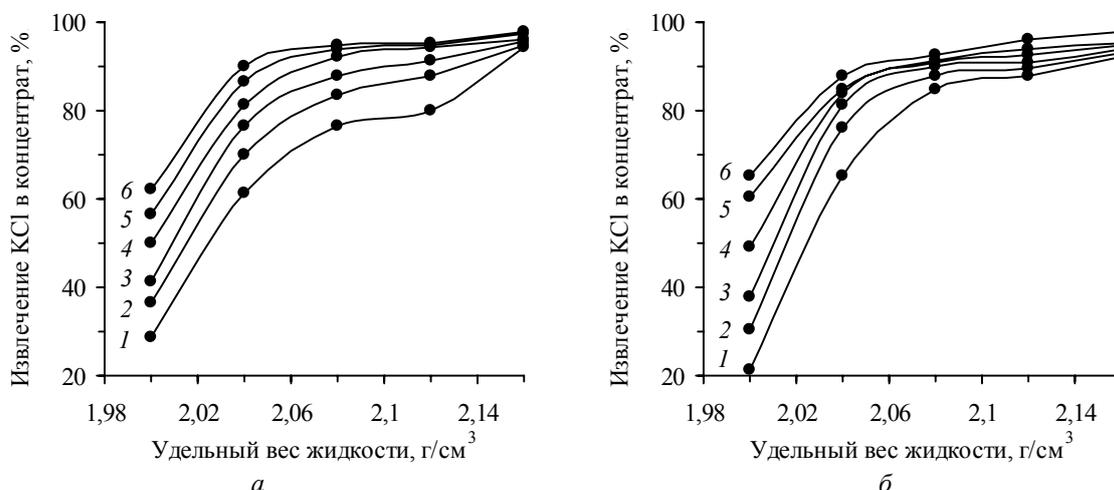


Рис. 2. Кривые извлечения КС1 в концентрат из руд 2-го (а) и 3-го (б) горизонтов 4-го шахтного поля различной степени измельчения, мм: 1 – (–5+0,25); 2 – (–3+0,25); 3 – (–1,6+0,25); 4 – (–1+0,25); 5 – (–0,8+0,25); 6 – (–0,5+0,25)

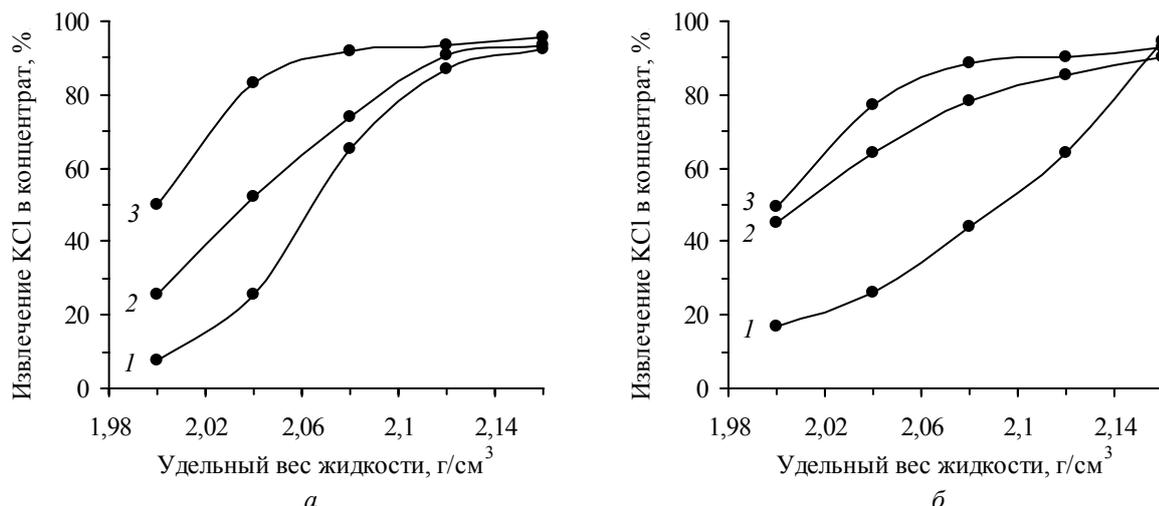


Рис. 3. Кривые извлечения КС1 из руд крупностью  $-1+0,25$  мм различных шахтных полей 2-го (а) и 3-го (б) горизонтов: 1 – 2-го; 2 – 3-го; 3 – 4-го шахтного поля

Теоретически возможные потери КС1 с хвостами составляют 2,9–3,9% для руды 2-го горизонта, 2,8–4,8% для руды 3-го горизонта.

На основании полученных результатов оптимальной степенью сухого измельчения при обогащении руды 4-го шахтного поля в тяжелых жидкостях следует считать ее измельчение до крупности  $-1$  мм.

Сравнительный анализ по обогащению руд всех ныне эксплуатируемых шахтных полей Старобинского месторождения показал, что наиболее высокая степень раскрытия зерен сильвинита при измельчении до крупности  $-1+0,25$  мм достигается именно для руды 4-го шахтного поля (рис. 3, а, б).

Данные фракционного анализа разделения сильвинитовой руды по плотностям свидетельствуют, что существенное раскрытие зерен нерастворимого в воде остатка от частиц и зерен соляных пород для всех без исключения руд Старобинского месторождения достигается при достаточно крупном измельчении (до  $-3$  мм). При этом руды 4-го шахтного поля характеризуются более высокой степенью раскрытия н. о. от сильвина и галита. Для руды этого шахтного поля также характерен высокий показатель извлечения н. о. в наиболее тонкодисперсные фракции ( $-0,25$  мм): 18,2–29,0% против 11,0–12,5% для других шахтных полей.

Показано, что обесшламливание руды 4-го шахтного поля методом флотации осуществляется с более высокой эффективностью, чем флотационное обесшламливание руды других шахтных полей. Так, извлечение н. о. в шламовый продукт для руды 2-го и 3-го горизонтов достигает 69,4 и 74,6% соответственно. Потери КС1 со шламами здесь, напротив, значительно ниже (1,4–2,0 %) по сравнению с рудами других шахтных полей (до 7,9–8,5%).

Такое anomальное поведение н. о. сильвинитовой руды 4-го шахтного поля объясняется минералогическим составом глинисто-карбонатных примесей, которые представлены преимущественно шестью основными породообразующими минералами: доломитом, кальцитом, гидрослюдой, полевыми шпатами, каолинитом и ангидритом, прочно сросшимися друг с другом. Так, высокое содержание доломита и кальцита, легко истирающихся при механическом воздействии, является причиной аномально высокого извлечения н. о. в тонкодисперсные фракции при сухом измельчении руды. Доломит и кальцит относятся к практически ненабухаемым и нерастворимым в воде минералам, что и предопределяет низкую степень диспергирования глинисто-карбонатных примесей в водно-солевых растворах и низкую эффективность механического обесшламливания этой руды. Однако минералы доломит и кальцит обладают пониженной гидрофильностью поверхности, плохо смачиваются водой, поэтому даже небольшие добавки реагентов-коллекторов резко увеличивают гидрофобность поверхности шламов, что способствует эффективному их выделению из руды при обесшламливании методом флотации и получению концентрата с пониженным содержанием н. о. Так, извлечение КС1 при сильвиновой флотации руды данного шахтного поля в зависимости от горизонта, расходов собирателя и депрессора (амин, крахмала) находится в пределах 94,2–96,7% при содержании КС1 в черновом концентрате 77,3–87,7%.

Таким образом, анализ экспериментальных данных по обогащению сильвинитовых руд 4-го шахтного поля в тяжелых жидкостях позволяет сделать вывод о возможной успешной технологической переработке указанных руд методом флотации при оптимальной степени ее измельчения до крупности менее 1 мм.

**Заключение.** Показано, что сильвинитовые руды 4-го шахтного поля характеризуются мелко- и среднезернистой вкрапленностью; при этом руды 3-го горизонта имеют более тонкую вкрапленность, чем руды 2-го горизонта, а также более высокую механическую прочность. Наличие текстурных и структурных особенностей в калиеносных горизонтах шахтного поля определило различный характер обогащения их руд. Наиболее высокое извлечение КС1 в концентрат наблюдается для руд 2-го горизонта. Изучение оптимальной степени измельчения руды, обеспечивающей максимальное раскрытие сростков галита, сильвина и нерастворимого в воде остатка, показало, что при измельчении руды 2-го и 3-го горизонтов до крупности менее 1 мм преобладающая часть сростков галита и сильвина

практически полностью раскрывается; концентраты, получаемые для фракций с крупностью зерен менее 1 мм, характеризуются высоким содержанием КС1 (95,1–96,1%).

#### Литература

1. Митрофанов, С. И. Исследование полезных ископаемых на обогащение / С. И. Митрофанов, А. А. Барский, В. Д. Самыгин. – М.: Недра, 1974. – 524 с.
2. Справочник по обогащению руд. – М.: Недра, 1972. – Т. 1. – 448 с.
3. Глембоцкий, В. А. Флотация / В. А. Глембоцкий, В. И. Классен. – М.: Недра, 1973. – 384 с.
4. Физикохимия селективной флотации калийных солей / Х. М. Александрович [и др.]. – Минск: Навука і тэхніка, 1983. – 272 с.

*Поступила 31.03.2010*