https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-82

BY 4.0
Check for updates

МРНТИ: 52.45.19

С.К. Танирбергенова[1], Қ. Қамұнұр[1,2], Л.К. Бейсембаева[1,2], Л.А. Мусапирова[1,2]*
[1]Институт проблем горения,
050012, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Богенбай батыра, 172
[2]Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
050040, Республика Казахстан, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 71
*e-mail: lyazzat.mussapyrova@gmail.com

СЕЛЕКТИВНАЯ ФЛОТАЦИЯ ИЛЬМЕНИТА С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЛИГНОСУЛЬФОНАТОВ

Аннотация: *В работе исследована возможность применения модифицированных лигносульфонатов в качестве флотационных реагентов для селективного обогащения ильменитовой руды Сатпаевского месторождения (Казахстан). Исходная руда характеризовалась высоким содержанием силикатной пустой породы (SiO_2 – 71,5%) и сравнительно низким содержанием TiO_2 (6,8%), что обусловливает необходимость использования селективных собирателей. Были синтезированы три серии модифицированных лигносульфонатов: глубокосульфированные (LS-S), пероксидно-окисленные (LS-O1) и перманганатно-окисленные (LS-O2). Реагенты охарактеризованы методами ИК-Фурье-спектроскопии, измерения поверхностного натяжения и ζ-потенциала.*

Установлено, что наилучшие флотационные показатели обеспечивает реагент LS-O2, полученный перманганатным окислением лигносульфоната натрия. Для данного реагента зафиксированы максимальное извлечение и селективность, наиболее отрицательный ζ-потенциал (−31 мВ) и наименьшее поверхностное натяжение (40,9 мН/м). Проведено исследование влияния pH пульпы, расхода реагента и температуры на эффективность флотации ильменита. Оптимальные условия процесса составили: pH 7,5, расход LS-O2 – 0,25 кг/т и температура 30°C. При данных параметрах достигнуты извлечение ильменита 73,4%, содержание TiO_2 в концентрате 20,8% и селективность 81,0%.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения модифицированных лигносульфонатов в качестве эффективных и относительно доступных реагентов для флотационного обогащения низкотитанистых ильменитовых руд.

Ключевые слова: *ильменитовая руда; селективная флотация; модифицированные лигносульфонаты; флотореагенты; обогащение титансодержащих руд.*

1. Введение

Ильменитовые руды являются одним из основных источников титансодержащего сырья, используемого для получения диоксида титана, металлического титана, сварочных электродов, защитных покрытий, специальных сплавов и функциональных материалов. В последние годы потребление титансодержащей продукции устойчиво возрастает вследствие развития авиационно-космической техники, химической промышленности, энергетики и машиностроения. Одновременно наблюдается постепенное истощение богатых месторождений, что приводит к необходимости вовлечения в переработку бедных, тонковкраплённых и комплексных ильменитовых руд с высоким содержанием силикатной пустой породы [1-3].

Обогащение подобных руд представляет значительные технологические трудности. Ильменит часто тесно ассоциирован с кварцем, полевыми шпатами и алюмосиликатами, а размеры раскрытия минералов нередко находятся в тонкодисперсной области [4-6]. При этом поверхностные свойства ильменита и сопутствующих силикатных минералов во многих случаях оказываются близкими, что осложняет селективное разделение. Дополнительные сложности связаны с высокой гидрофильностью поверхности кварца, присутствием поверхностных гидроксильных групп и изменением зарядового состояния минералов в зависимости от pH среды.

©С.К. Танирбергенова, Қ. Қамұнұр, Л.К. Бейсембаева, Л.А. Мусапирова, 2026

Наиболее эффективным методом обогащения тонковкраплённых титансодержащих руд остаётся флотация. Для флотации ильменита традиционно применяются анионные собиратели на основе жирных кислот, их солей, гидроксамовых кислот и некоторых фосфорорганических соединений [7-10]. Однако использование таких реагентов сопровождается рядом недостатков: повышенным расходом, ограниченной селективностью, чувствительностью к составу пульпы, а также сравнительно высокой стоимостью отдельных типов реагентов. Кроме того, многие традиционные собиратели характеризуются недостаточной экологической безопасностью и низкой биоразлагаемостью, что ограничивает перспективы их широкого промышленного применения.

В связи с этим значительный интерес представляет разработка флотореагентов на основе доступного возобновляемого сырья, способных обеспечивать селективное взаимодействие с поверхностью титансодержащих минералов. Одним из наиболее перспективных классов подобных веществ являются лигносульфонаты - водорастворимые производные технического лигнина, образующиеся в качестве побочных продуктов сульфитной переработки древесины. Лигносульфонаты содержат развитую систему ароматических, фенольных, карбоксильных и сульфонатных групп, благодаря чему обладают поверхностной активностью и способностью к комплексообразованию с ионами металлов [11-15].

Химическая модификация лигносульфонатов позволяет существенно изменять их физико-химические свойства и направленно повышать флотационную активность. В частности, окислительная модификация способствует образованию карбонильных и хиноидных структур, способных к донорно-акцепторному взаимодействию с координационно-ненасыщенными поверхностными центрами Fe^{3+} и Ti^{4+} на поверхности ильменита [16]. Одновременно сульфонатные группы обеспечивают растворимость реагента и стабилизацию адсорбционного слоя, а фенольные фрагменты могут участвовать в образовании водородных связей с поверхностными гидроксильными группами минералов.

Несмотря на перспективность модифицированных лигносульфонатов, их применение в процессах флотационного обогащения ильменитовых руд изучено недостаточно. В литературе ограниченно представлены данные о влиянии типа модификации лигносульфонатов на показатели извлечения и селективности, а также о механизмах взаимодействия подобных реагентов с поверхностью ильменита и кварца. Особенно актуальным является поиск реагентов, обеспечивающих эффективную флотацию низкотитанистых руд с высоким содержанием силикатной пустой породы.

В настоящей работе исследована возможность применения модифицированных лигносульфонатов в качестве флотационных реагентов для обогащения ильменитовой руды Сатпаевского месторождения. Проведён синтез нескольких серий модифицированных реагентов, включающих глубокосульфированные, пероксидно-окисленные и перманганатно-окисленные образцы. Выполнена их сравнительная характеристика по поверхностно-активным и электрокинетическим свойствам, а также изучено влияние pH пульпы, расхода реагента и температуры на показатели флотации.

Научная новизна настоящей работы заключается в применении перманганатно-окисленного лигносульфоната натрия LS-O2 в качестве селективного флотационного реагента для обогащения низкотитанистой ильменитовой руды Сатпаевского месторождения. В отличие от традиционных собирателей на основе жирных и гидроксамовых кислот, предложенный реагент получен на основе доступного водорастворимого производного технического лигнина и содержит сульфонатные, фенольные, карбонильные и хиноидные функциональные группы. Наличие данных групп обеспечивает возможность селективного взаимодействия с катионными поверхностными центрами Fe^{3+} и Ti^{4+} на поверхности ильменита. В работе впервые для данной руды проведено сопоставление различных типов модификации лигносульфонатов и показано, что перманганатно-окисленный образец LS-O2 обеспечивает наилучшее сочетание извлечения, селективности, поверхностной активности и электрокинетических характеристик.

2. Материалы и методы

2.1. Исходная руда

В качестве объекта исследования использовалась представительная проба ильменитовой руды Сатпаевского месторождения. Проба была высушена при 105°C до

постоянной массы, раздроблена на щековой дробилке до крупности менее 5 мм и измельчена в лабораторной шаровой мельнице до крупности 85% класса −74 мкм.

2.2 Синтез флотореагентов

Исходным сырьём служила натриевая соль технического лигносульфоната (Na-ЛС), получаемая в качестве побочного продукта сульфитной варки древесины. Структурная основа Na-ЛС – полифенилпропановый скелет с сульфонатными группами – SO_3Na, введёнными в ходе варки, и разветвлённой сетью эфирных, карбоксильных и фенольных фрагментов. Перманганатное окисление проводили в водном растворе при следующих параметрах: концентрация Na-ЛС – 5 мас.%, мольное соотношение $KMnO_4$: ЛС = 0,40 (из расчёта на фенольные фрагменты), pH реакционной среды – 9,0 (поддерживался добавлением 0,1 М NaOH), температура – 50°C, продолжительность реакции - 2 ч при интенсивном перемешивании (500 об/мин). По завершении реакции избыток $KMnO_4$ гасили добавлением 30%-го пероксида водорода (0,5 мл на 100 мл раствора), нерастворимый MnO_2 отделяли вакуумным фильтрованием. Для систематического поиска синтезированы три серии: глубокое сульфирование (LS-S), пероксидное окисление H_2O_2 (LS-O1) и перманганатное окисление $KMnO_4$ (LS-O2).

2.3. Методы характеризации руды и реагентов

Химический состав руды определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ICP-OES, PerkinElmer Optima 8000). Навеску руды разлагали смесью HF + HNO_3 + $HClO_4$ при нагревании, раствор разбавляли до 100 мл и анализировали на содержание Ti, Fe, Si, Al, Mg, Ca и других элементов.

Гранулометрический состав измельчённой руды определяли методом лазерной дифракции на анализаторе Mastersizer 3000 (Malvern Panalytical) в диапазоне 0,1-3500 мкм.

Морфологию поверхности частиц изучали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на приборе FE MIRA 3 (TESCAN, Чехия). Элементный состав отдельных зёрен определяли методом энергодисперсионного рентгеновского анализа (EDAX) на том же приборе. Образцы напыляли тонким слоем углерода для обеспечения электропроводности.

ИК-спектры руды и реагента регистрировали на ИК-Фурье-спектрометре Bruker Tensor 27 в диапазоне 400-4000 $см^{-1}$ методом нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО). Разрешение составляло 4 $см^{-1}$, число сканирований – 32.

Поверхностное натяжение 0,1%-х водных растворов реагента измеряли методом максимального давления пузырька на приборе MPT2 (Lauda) при температуре 25°C.

ζ-потенциал суспензий минералов в присутствии реагента определяли методом электрофоретического рассеяния света на приборе Zetasizer Nano ZS (Malvern) при pH 7,0 ± 0,1 и температуре 25°C. Концентрация твёрдого составляла 0,05 г/л.

2.4. Флотационные испытания

Флотацию ильменитовой руды проводили на лабораторной механической флотационной машине объёмом 1 $дм^3$. Содержание твёрдого в пульпе составляло 20% (мас.), pH пульпы поддерживали на уровне 6,5-8,5 добавлением NaOH или H_2SO_4. Реагент подавали в пульпу в виде 1%-го водного раствора в дозировке 0,1–0,5 кг/т. В качестве вспенивателя применяли сосновое масло (50 г/т). Время кондиционирования пульпы с реагентом – 3 мин, продолжительность флотации – 5 мин.

Флотационные продукты (концентрат и хвосты) фильтровали, высушивали при 105°C и анализировали на содержание TiO_2 и Fe_2O_3 методом ICP-OES. Каждый эксперимент проводили в трёх повторениях; отклонение не превышало ±5%. Оценку результатов проводили по двум критериям: извлечение ильменита в концентрат η (%) и селективность флотации S (%), рассчитываемая как отношение извлечения ильменита к суммарному извлечению ильменита и кварца в концентрат.

3. Результаты и обсуждение

3.1 Характеристика исходной ильменитовой руды

Химический состав руды представлен в таблице 1. Руда характеризуется высоким содержанием кремнезёма (SiO_2 = 71,5%), что свидетельствует о значительной доле кварца и силикатных минералов в составе пробы. Содержание диоксида титана составляет 6,8%, суммарное содержание оксидов железа – 14,9% (Fe_2O_3 + FeO). Присутствие Al_2O_3 (4,3%) указывает на алюмосиликатные фазы.

Таблица 1 – Химический состав ильменитовой руды (ICP-OES, пересчёт на оксиды)

Оксид	SiO_2	TiO_2	Fe_2O_3	FeO	Al_2O_3	MgO	CaO
Содержание, %	71,5	6,8	11,2	3,7	4,3	1,1	1,2

Фазовый анализ показал, что основными кристаллическими фазами руды являются каолинит $Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$, калиевый полевой шпат $K(Al,Fe)Si_3O_8$ и натриевый плагиоклаз $Na(AlSi_3O_8)$, формирующие силикатную пустую породу. Целевой минерал – ильменит $FeTiO_3$ – представлен рефлексами низкой интенсивности, что согласуется с его относительно невысоким содержанием в руде. Присутствие кварца SiO_2 подтверждается характеристическим рефлексом при $2\theta \approx 26{,}6°$ (рис. 1).

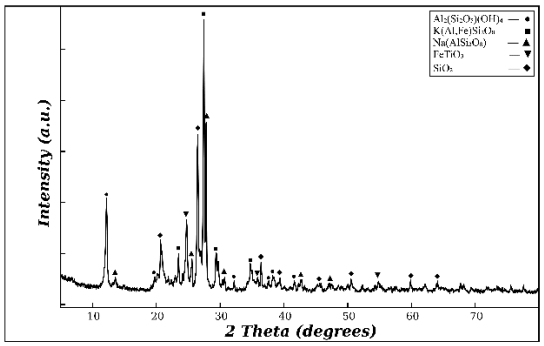


Рисунок 1 – Рентгеновская дифрактограмма исходной руды

Гранулометрический анализ методом лазерной дифракции показал, что частицы измельчённой руды распределены преимущественно в диапазоне 20-80 мкм с максимумом объёмного распределения в области 50-60 мкм (рис. 2).

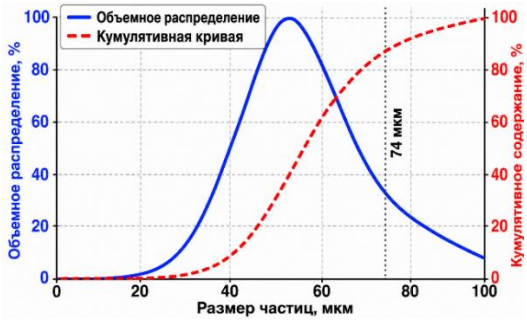
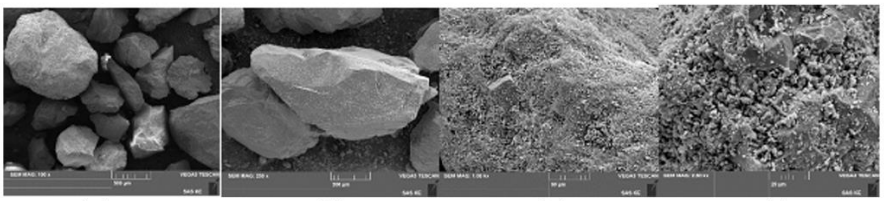


Рисунок 2 – Распределение частиц ильменитовой руды по размерам

Кривая объёмного распределения имеет выраженный однофазный характер без резких пиков и провалов, что указывает на равномерное измельчение и отсутствие значительного переизмельчения. Кумулятивная кривая плавно возрастает и достигает 85% при крупности около 74 мкм, что соответствует заданной степени измельчения и является благоприятным для последующей флотации.

Анализ СЭМ-изображений (рис. 3) показал, что частицы руды представляют собой преимущественно плотные угловатые зёрна изометричной или таблитчатой формы размером 50–150 мкм.



(а) (б) (в) (г)

а – увеличение в 100 раз; б – увеличение в 250 раз; в увеличение в 1000 раз; г – увеличение в 2600 раз

Рисунок 3 – Изображения СЭМ пробы ильменитовой руды

При увеличении ×100 фиксируется гранулометрическая однородность и отсутствие агрегирования частиц. При увеличении ×250 отчётливо видны чёткие границы между зёрнами ильменита и кварца, поверхность которых частично покрыта мелкими дефектами и трещинами. При увеличении ×1000 выявляются зоны частичного окисления и развитие микропористой структуры, характерной для умеренно выветрелого ильменита. При наибольшем увеличении (×2600) наблюдается микрорельеф с выступами и кавернами, отражающий процессы поверхностной деградации минерала.

На ИК-спектре (рис. 4) исходной руды выявлены следующие характерные полосы поглощения: при 560 $см^{-1}$ – валентные колебания Fe–O (ильменит, магнетит); при 670 $см^{-1}$ – колебания Ti-O (ильменит); в области 1000-1100 $см^{-1}$ – интенсивные колебания Si–O (кварц). Широкие полосы при 3400 и 1630 $см^{-1}$ отвечают адсорбированной воде и поверхностным гидроксильным группам –OH.

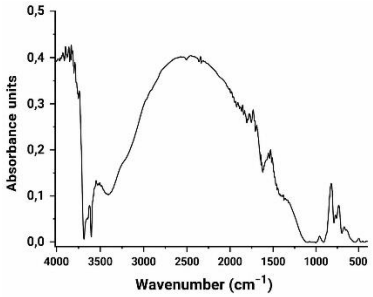


Рисунок 4 – ИК спектр исходной ильменитовой руды

Наличие поверхностных гидроксильных групп имеет ключевое значение для флотации: именно через центры –OH, а также через координационно-ненасыщенные ионы Fe^{3+} и Ti^{4+} на поверхности ильменита реализуется адсорбция реагента.

3.2 Характеризация образцов модифицированных лигносульфонатов

Характеризацию образцов модифицированных лигносульфонатов проводили в модельной системе «барит-кварц», выбранной как система для оценки селективности реагентов по отношению к минералам с катионными поверхностными центрами. Модельная система «барит-кварц» использовалась на предварительном этапе исследования для сравнительного скрининга синтезированных модифицированных лигносульфонатов. Выбор данной системы обусловлен необходимостью оценки селективности реагентов по отношению к минералам с катионными поверхностными центрами и силикатной пустой породе. При этом полученные результаты рассматривались только как предварительный критерий выбора наиболее активного реагента. Основные флотационные испытания были выполнены непосредственно на ильменитовой руде в системе «ильменит-кварц», что соответствует объекту настоящего исследования.

В таблице 2 приведены сводные характеристики лучших образцов каждой серии.

Таблица 2 – Сравнительные характеристики образцов модифицированных лигносульфонатов

Образец	Тип модификации	η (барит), %	S, %	Поверхностное натяжение, мН/м	ζ-потенциал, мВ
LS-S	Глубокое сульфирование	65,4	74,6	42,7	−29
LS-O1	Пероксидное окисление	65,9	76,2	44,1	−27
LS-O2	Перманганатное окисление	69,8	79,6	40,9	−31

Можно видеть, что реагент LS-O2 обеспечивает наибольшее извлечение барита (69,8%) при высокой селективности (79,6%), максимальном по модулю ζ-потенциале (−31 мВ) и низком поверхностном натяжении (40,9 мН/м). Данный факт можно объяснить тем, что образующиеся хиноидные и карбонильные центры способны к специфическому донорно-акцепторному комплексообразованию с ионами Fe^{3+} и Ti^{4+} поверхности ильменита, что обосновывает перенос реагента в ильменитовую флотационную систему. Указанный реагент далее использовался для флотационных испытаний.

3.3 Флотация ильменитовой руды с реагентом LS-O2

Флотационные испытания проводились в системе «ильменит-кварц» на измельчённой руде Сатпаевского ГОП при последовательной оптимизации трёх параметров: pH пульпы, расхода реагента LS-O2 и температуры. Критериями оценки служили извлечение ильменита в концентрат η (%) и селективность флотации S (%).

На рисунке 5 приведено влияние pH пульпы на извлечение целевого компонента и селективность при флотации.

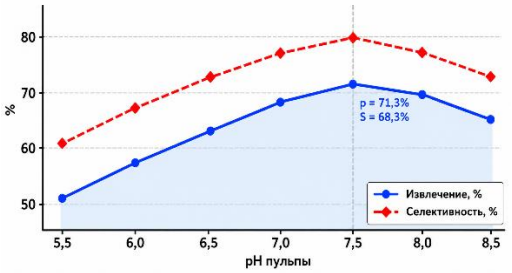


Рисунок 5 – Влияние pH пульпы на показатели флотации ильменита с реагентом LS-O2. Значения представлены как среднее по трём параллельным опытам; погрешность не превышала ±5%

Выраженный оптимум наблюдается при pH 7,5: η = 71,9%, содержание TiO_2 в концентрате – 20,2%, S = 80,3%. При pH < 7,0 показатели снижаются вследствие протонирования хиноидных и карбоксильных групп реагента, уменьшающего их сродство к Fe^{3+} и Ti^{4+}. При pH > 8,0 конкуренция гидроксид-ионов за поверхностные центры ильменита и усиление адсорбции на силанольных группах кварца снижают как извлечение, так и селективность.

При сравнении образцов модифицированных лигносульфонатов по извлечению были получены следующие значения: LS-S – 65,4 ± 0,5%, LS-O1 – 65,9 ± 0,6%, LS-O2 – 69,8 ± 0,6%. Относительное стандартное отклонение составило соответственно 0,75; 0,95 и 0,89%. Для оптимальных условий флотации ильменитовой руды извлечение ильменита составило 73,4 ± 2,1%, содержание TiO_2 в концентрате – 20,8 ± 0,7%, селективность флотации – 81,0 ± 2,4%. Соответствующие значения RSD составили 2,86; 3,37 и 2,96%, что не превышает 5%. Сопоставление средних значений и 95%-х доверительных интервалов показало, что образец LS-O2 характеризуется более высоким извлечением по сравнению с LS-S и LS-O1. При этом различия между LS-S и LS-O1 находятся в пределах экспериментальной погрешности. Дополнительным подтверждением выбора LS-O2 являются его физико-химические характеристики: наименьшее поверхностное натяжение – 40,9 мН/м – и наиболее отрицательный ζ-потциал – −31 мВ.

Влияние расхода реагента на показатели флотации приведено на рисунке 6.

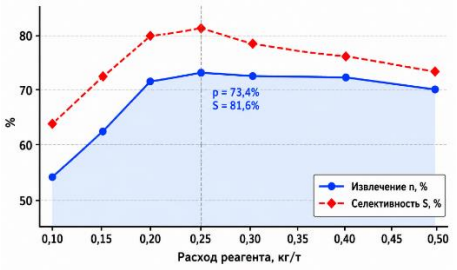


Рисунок 6 – Влияние расхода LS-O2 на показатели флотации ильменита. Значения представлены как среднее по трём параллельным опытам; погрешность не превышала ±5%

В диапазоне 0,10-0,25 кг/т наблюдается монотонный рост η и S, соответствующий постепенному заполнению адсорбционных центров на поверхности ильменита. При расходе 0,25 кг/т, по-видимому, достигается насыщение монослоя. Дальнейшее увеличение дозы не повышает извлечение, однако снижает селективность до 73,4% при 0,50 кг/т вследствие неизбирательной адсорбции избытка реагента на кварце. Оптимальный расход составляет 0,25 кг/т.

Температура пульпы влияет на скорость адсорбции реагента, вязкость жидкой фазы и стабильность пены. Испытания проводились в диапазоне 15-40°C при pH = 7,5 и расходе LS-O2 0,25 кг/т (рис. 7).

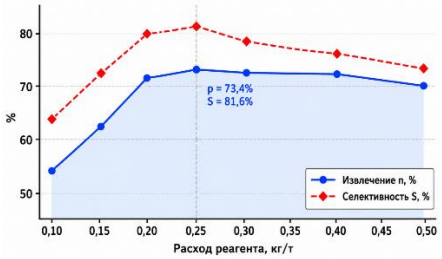


Рисунок 7 – Влияние температуры пульпы на показатели флотации ильменита с реагентом LS-O2 (pH 7,5; расход 0,25 кг/т). Значения представлены как среднее по трём параллельным опытам; погрешность не превышала ±5%

Повышение температуры от 15 до 30°C улучшает показатели за счёт ускорения диффузии молекул реагента и снижения вязкости пульпы. В диапазоне 30-35°C показатели стабилизируются на максимальном уровне. При 40°C наблюдается небольшое снижение вследствие уменьшения устойчивости пены и частичной десорбции реагента. С учётом близких результатов при 25°C и 30°C и соображений энергопотребления оптимальной выбрана температура 30°C.

Оптимальные условия флотации и итоговые показатели сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Оптимальные условия флотации ильменита с реагентом LS-O2 и достигаемые показатели

Параметр	Значение
pH пульпы	7,5
Расход LS-O2	0,25 кг/т
Температура пульпы	30°C
Вспениватель (сосновое масло)	50 г/т
Время кондиционирования	3 мин
Время флотации	5 мин
Извлечение ильменита η	73,4%
Содержание TiO_2 в концентрате	20,8%
Селективность S	81,0%

При оптимальных условиях достигается извлечение ильменита η = 73,4% при содержании TiO_2 в концентрате 20,8% (исходное содержание в руде – 6,8%, обогащение в 3,1 раза) и селективности S = 81,0%. Извлечение кварца в концентрат не превышает 19%, что подтверждает высокую избирательность реагента.

Можно предположить, что механизм действия LS-O2 реализуется через многоточечную адсорбцию на поверхности $FeTiO_3$: хиноидные и карбонильные группы образуют координационные комплексы с Fe^{3+} и Ti^{4+} (хемосорбция), сульфонатные $–SO_3^-$ стабилизируют слой электростатически, фенольные –OH участвуют в водородных связях с поверхностными гидроксилами. На поверхности кварца, лишённой катионных центров Fe^{3+}/Ti^{4+}, специфическая адсорбция реагента значительно слабее, что и определяет наблюдаемую селективность разделения.

Таким образом, реагент LS-O2, синтезированный перманганатным окислением Na-ЛС, при оптимальных условиях (pH 7,5; расход 0,25 кг/т; T = 30°C) обеспечивает извлечение ильменита 73,4% при селективности 81,0%, что свидетельствует о высокой эффективности данного собирателя при флотации ильменитовой руды Сатпаевского ГОП.

3.4 Предварительная экономическая оценка применения LS-O2

Предварительная оценка стоимости синтеза LS-O2 была выполнена с учётом расхода основных реагентов. При условном расчёте на 1 кг исходного лигносульфоната натрия основные затраты включают: 1 кг Na-ЛС – 0,33-0,67 USD; 0,30-0,35 кг $KMnO_4$ – 0,56-1,73 USD;

0,10 кг 30%-го H_2O_2 – менее 0,10 USD. Таким образом, ориентировочная стоимость реагентов для получения 1 кг LS-O2 может составлять примерно 0,99-2,50 USD без учёта затрат на воду, фильтрование MnO_2, сушку, энергию и трудозатраты.

При оптимальном расходе LS-O2 0,25 кг/т руды ориентировочная реагентная стоимость его применения составляет около 0,25-0,63 USD/т руды. Это ниже, чем возможные затраты при использовании ряда гидроксамовых собирателей, стоимость которых обычно выше из-за синтетической природы и специализированного назначения.

4. Заключение

В работе исследована возможность применения модифицированных лигносульфонатов в качестве флотационных реагентов при обогащении ильменитовой руды Сатпаевского месторождения. Показано, что исходная руда характеризуется высоким содержанием силикатной пустой породы, при этом ильменит представлен в тонковкраплённой форме, что требует использования селективных собирателей.

Синтезированы три серии модифицированных лигносульфонатов: глубокосульфированные (LS-S), пероксидно-окисленные (LS-O1) и перманганатно-окисленные (LS-O2). Наиболее эффективным оказался реагент LS-O2, полученный перманганатным окислением лигносульфоната натрия. Для него установлены наибольшие значения извлечения и селективности, а также наиболее отрицательный ζ-потенциал и наименьшее поверхностное натяжение, что свидетельствует о высокой поверхностной активности и способности к селективной адсорбции.

Установлено, что оптимальные условия флотации ильменитовой руды составляют: pH пульпы 7,5; расход реагента LS-O2 – 0,25 кг/т; температура пульпы – 30°C. При данных параметрах достигается извлечение ильменита 73,4%, содержание TiO_2 в концентрате 20,8% и селективность 81,0%. По сравнению с исходной рудой содержание TiO_2 возрастает в 3,1 раза.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения модифицированных лигносульфонатов в качестве эффективных и относительно доступных реагентов для флотационного обогащения низкотитанистых ильменитовых руд.

Список литературы

1. Methods of extracting TiO_2 and other related compounds from ilmenite / A.J. Sampath et al // Minerals. – 2023. – Vol. 13, № 5. – Art. 662.
2. Processing of titanium-containing ores for the production of titanium products: A comprehensive review / G. Maldybayev et al // Heliyon. – 2024. – Vol. 10, № 3.
3. A review of the solid-state reduction aspects of ilmenite for efficient and sustainable production of TiO_2 slag / D. Nayak et al // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 2025. – Vol. 46, № 4. – P. 517–536.
4. Chen Q. Surface oxidation promotes the flotation of ilmenite: A critical review / Q. Chen, Z. Chen, R.M. Kasomo // Minerals and Mineral Materials. – 2024.
5. Research progress of ilmenite surface modification flotation separation technology / J. Yuan et al // Nonferrous Metals Engineering. – 2024. – Vol. 14, № 9.
6. Flotation behavior and mechanism of ilmenite using ferrate as activator / R. Liao et al // Minerals Engineering. – 2022. – Vol. 178. – Art. 107400.
7. Effect of grinding media on surface property and flotation performance of ilmenite / C. Dai et al // Powder Technology. – 2024. – Vol. 447. – Art. 120232.
8. Reagent types and action mechanisms in ilmenite flotation: A review / J. Cai et al // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. – 2022. – Vol. 29, № 9. – P. 1656-1669.
9. Novel bifunctional collector for efficient separation of low-grade ilmenite: Selectivity enhancement and mechanistic elucidation / Y. Kang et al // Chemical Engineering Science. – 2026. – Art. 123438.
10. Study on the mineral characteristics and separation performances of a low-TiO_2 ilmenite / Q. Meng et al // Minerals Engineering. – 2022. – Vol. 179. – Art. 107458.
11. Foaming properties of lignosulfonates in the flotation process / J. Chique et al // Polymers. – 2023. – Vol. 15, № 17. – Art. 3575.

12. Guo Y. High-efficiency flotation of smithsonite in the presence of fine chlorite by using dispersant of sodium lignosulfonate / Y. Guo, Z. Fu, S. Ren // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2022. – Vol. 649. – Art. 129543.
13. Differential depression of calcium lignosulfonate on chalcopyrite and molybdenite flotation with collector kerosene / G. Liang et al // Minerals Engineering. – 2023. – Vol. 201. – Art. 108192.
14. A critical review on natural surfactants and their potential for sustainable mineral flotation / A. Oulkhir et al // Reviews in Environmental Science and Bio/Technology. – 2023. – Vol. 22, № 1. – P. 105-131.
15. Study on the mechanism of calcium lignosulfonate in chromium-free flotation separation of chalcopyrite and galena / C. Su et al // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2025. – Vol. 724. – Art. 137445.
16. Zhang Y. A comparison of sodium silicate and ammonium lignosulfonate effects on xenotime and selected gangue mineral microflotation / Y. Zhang, C. Anderson // Minerals Engineering. – 2017. – Vol. 100. – P. 1-8.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки МНВО РК по ПЦФ № BR28713557 «Разработка комплексных технологий переработки ильменитовых песков, баритовых руд и металлосодержащих отходов для повышения ресурсной эффективности горно-металлургической и строительной отраслей Казахстана».

С.К. Танирбергенова[1], Қ. Қамұнұр[1,2], Л.К. Бейсембаева[1,2], Л.А. Мусапирова[1,2]*
[1]Жану проблемалары институты, 050012, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Бөгенбай батыр к., 172
[2]Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., әл-Фараби даңғылы, 71
*e-mail: lyazzat.mussapyrova@gmail.com

ИЛЬМЕНИТТІ МОДИФИКАЦИЯЛАНҒАН ЛИГНОСУЛЬФОНАТТАРДЫ ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ СЕЛЕКТИВТІ ФЛОТАЦИЯЛАУ

Жұмыста модификацияланған лигносульфонаттарды Сәтбаев кен орнының (Қазақстан) ильменит кенін селективті байытуға арналған флотациялық реагенттер ретінде қолдану мүмкіндігі зерттелді. Бастапқы кен құрамында силикатты бос жыныстардың мөлшері жоғары (SiO_2 – 71,5%) және TiO_2 мөлшері салыстырмалы түрде төмен (6,8%) болғандықтан, селективті жинағыштарды қолдану қажеттілігі туындайды. Модификацияланған лигносульфонаттардың үш сериясы синтезделді: терең сульфирленген (LS-S), пероксидті-тотықтырылған (LS-O1) және перманганатты-тотықтырылған (LS-O2). Реагенттер ИҚ-Фурье-спектроскопиясы, беттік керілу мен ζ-потенциалды өлшеу әдістерімен сипатталды.

Ең жоғары флотациялық көрсеткіштер натрий лигносульфонатын перманганатты тотықтыру арқылы алынған LS-O2 реагенті үшін анықталды. Аталған реагент үшін максималды шығым мен селективтілік, ең теріс ζ-потенциал (−31 мВ) және ең төменгі беттік керілу (40,9 мН/м) тіркелді. Ильменит флотациясының тиімділігіне пульпа pH-ының, реагент шығынының және температураның әсері зерттелді. Процестің оңтайлы шарттары: pH 7,5, LS-O2 шығыны – 0,25 кг/т және температура 30°C болып анықталды. Осы параметрлер кезінде ильменittің шығымы 73,4%, концентраттағы TiO_2 мөлшері 20,8% және селективтілік 81,0% болды.

Алынған нәтижелер модификацияланған лигносульфонаттарды төмен титанды ильменит кендерін флотациялық байыту үшін тиімді әрі салыстырмалы түрде қолжетімді реагенттер ретінде қолданудың перспективалы екенін көрсетеді.

Түйін сөздер: *ильменит кені; селективті флотация; модификацияланған лигносульфонаттар; флотореагенттер; титанды кендерді байыту.*

S.K. Tanirbergenova[1], K. Kamunur[1,2], L.K. Beisembayeva[2], L.A. Mussapyrova[1,2]*
[1]Institute of Combustion Problems, 172, Bogenbay Batyr St., Almaty, 050012, Republic of Kazakhstan
[2]Al-Farabi Kazakh National University, Republic of Kazakhstan,
Almaty 050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, 71 Al-Farabi Avenue
*e-mail: lyazzat.mussapyrova@gmail.com

SELECTIVE FLOTATION OF ILMENITE USING MODIFIED LIGNOSULFONATES

This study investigates the feasibility of using modified lignosulfonates as flotation reagents for the selective beneficiation of ilmenite ore from the Satpayev deposit (Kazakhstan). The raw ore was characterized by a high content of silicate gangue minerals (SiO_2 – 71.5%) and a relatively low TiO_2 content (6.8%), which necessitates the use of selective collectors. Three series of modified lignosulfonates were synthesized: deeply sulfonated (LS-S), peroxide-oxidized (LS-O1), and permanganate-oxidized (LS-O2). The reagents were characterized by FTIR spectroscopy, surface tension measurements, and ζ-potential analysis.

The highest flotation performance was achieved with the LS-O2 reagent obtained by permanganate oxidation of sodium lignosulfonate. This reagent exhibited the maximum recovery and selectivity, the most negative ζ-potential (−31 mV), and the lowest surface tension (40.9 mN/m). The effects of pulp pH, reagent dosage, and temperature on the flotation efficiency of ilmenite were investigated. The optimal process conditions were determined as follows: pH 7.5, LS-O2 dosage of 0.25 kg/t, and temperature of 30°C. Under these conditions, an ilmenite recovery of 73.4%, TiO_2 content in the concentrate of 20.8%, and selectivity of 81.0% were achieved.

The obtained results demonstrate the promising potential of modified lignosulfonates as effective and relatively cost-efficient reagents for the flotation beneficiation of low-grade ilmenite ores.

Key words: *ilmenite ore; selective flotation; modified lignosulfonates; flotation reagents; beneficiation of titanium-bearing ores.*

Сведения об авторах

Сандугаш Танирбергенова – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник, заместитель генерального директора по науке РГП на ПХВ «Институт проблем горения»; e-mail: Sandu2201@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6377-0913.

Кастер Қамұнұр – PhD доктор, ведущий научный сотрудник, РГП на ПХВ «Институт проблем горения»; e-mail: kamunur.k@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-0013-1926.

Луиза Бейсембаева – кандидат химических наук, доцент факультета химии и химической технологии, Казахский национальный университет имени аль-Фараби; e-mail: beisembaeva_l@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7529-673X.

Ляззат Мусапирова* – PhD доктор, ведущий научный сотрудник, РГП на ПХВ «Институт проблем горения»; e-mail: lyazzat.mussapyrova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9881-1324.

Авторлар туралы мәліметтер

Сандугаш Танирбергенова – химия ғылымдарының кандидаты, жетекші ғылыми қызметкер, ШЖҚ РМК «Жану проблемалары институты» бас директордың ғылым жөніндегі орынбасары; e-mail: sandu2201@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6377-0913.

Кастер Камунур – PhD доктор, жетекші ғылыми қызметкер, ШЖҚ РМК «Жану проблемалары институты»; e-mail: kamunur.k@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-0013-1926.

Луиза Бейсембаева – химия ғылымдарының кандидаты, доцент, химия және химиялық технология факультеті, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті; e-mail: beisembaeva_l@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7529-673X.

Ляззат Мусапирова* – PhD доктор, жетекші ғылыми қызметкер, ШЖҚ РМК «Жану проблемалары институты»; e-mail: lyazzat.mussapyrova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9881-1324.

Information about the authors

Sandugash Tanirbergenova – Candidate of Chemical Sciences, Leading Researcher, Deputy Director General for Science at the RSE REM «The institute of combusting problems»; e-mail: sandu2201@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6377-0913.

Kaster Kamunur – PhD, Senior Researcher, «Institute of Combustion Problems»; e-mail: kamunur.k@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-0013-1926.

Luisa Beisembayeva – Candidate of Chemical Sciences, Ass. Prof., Faculty of Chemistry and Chemical Technology, al-Farabi KazNU; e-mail: beisembaeva_l@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7529-673X.

Lyazzat Mussapyrova – PhD, leading researcher, «Institute of Combustion Problems»; e-mail: lyazzat.mussapyrova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9881-1324.

Поступила в редакцию 05.06.2026
Поступила после доработки 30.06.2026
Принята к публикации 03.07.2026