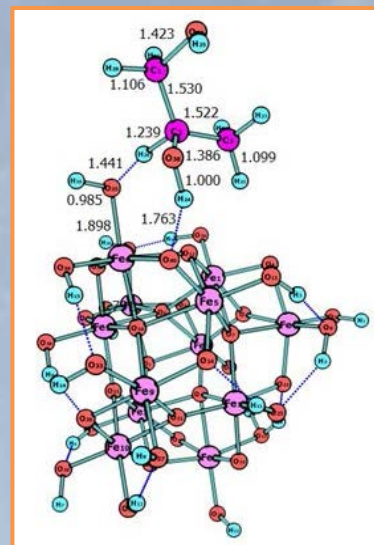


Бутлеровские сообщения

№8, том 67. 2021



ISSN 2074-0212
рускоязычная печатная
версия с 2009 года



International Edition in English from 2009 (Print):

Butlerov Communications ISSN 2074-0948

International Edition in English from 2021 (Online):

Butlerov Communications A

Advances in Organic Chemistry & Technologies

Butlerov Communications B

Advances in Chemistry & Thermophysics

Butlerov Communications C

Advances in Biochemistry & Technologies



**Юридическим учредителем журнала “Бутлеровские сообщения” является
ООО “Инновационно-издательский дом “Бутлеровское наследие”**

Журнал является официальным печатным органом Научного фонда им. А.М. Бутлерова (НФБ), которому также делегировано право юридически представлять интересы журнала.

Организационно в журнале существует институт соучредительства, в рамках которого с соучредителем подписывается Договор или Соглашение о научно-техническом, инновационном и научном издательском сотрудничестве.

В 2021 году соучредителями журнала являются:

- 1. Бурятский государственный университет,**
- 2. Всероссийский научно-исследовательский и технологический институт биологической промышленности,**
- 3. Ивановский государственный университет,**
- 4. Институт химии нефти СО РАН,**
- 5. Кемеровский государственный университет,**
- 6. Научный фонд им. А.М. Бутлерова,**
- 7. Общественная организация Республиканское химическое общество им. Д.И. Менделеева Татарстана,**
- 8. Пермская государственная фармацевтическая академия,**
- 9. Пермский национальный исследовательский политехнический университет,**
- 10. Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина,**
- 11. Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева,**
- 12. Самарский государственный технический университет,**
- 13. Самарский государственный университет,**
- 14. Санкт-Петербургский государственный химико-фармацевтический университет,**
- 15. Саратовский государственный университет,**
- 16. Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого,**
- 17. Тульский государственный университет,**
- 18. Федеральное казенное предприятие “НИИ химических продуктов” (г. Казань),**
- 19. Челябинский государственный университет,**
- 20. Казанский национальный исследовательский технологический университет.**

Главные редакторы: Миронов Владимир Фёдорович и Самуилов Яков Дмитриевич
Исполнительный редактор: Курдюков Александр Иванович

Адрес редакции:

ул. Бондаренко, 33-44. г. Казань, 420066. Республика Татарстан. Россия.

Контактная информация:

Сот. тел.: 8 917 891 2622

Электронная почта: butlerov@mail.ru или journal.bc@gmail.ru

Интернет: <http://butlerov.com/>

Свободная цена.

Тираж – менее 1100 шт.

Тираж отпечатан 31 августа 2021 г.

Применение процесса флотации для обогащения ильменитовых руд из Вьетнама

© Ле Шон Хай, Киеу Тхуан Бач, Карелин*[†] Владимир Александрович,
Жерин Иван Игнатьевич, Карелина Надежда Владимировна
и Смороков Андрей Аркадьевич

Отделение ядерно-топливного цикла Инженерной ядерно-технологической школы. Национальный
исследовательский Томский политехнический университет. пр. Ленина, 30. г. Томск, 634050.
Томская область. Россия. Тел.: +7 (3822) 701777 Вн.т. 2269. E-mail: vakarelin@tpu.ru

*Ведущий направление; [†]Поддерживающий переписку

Ключевые слова: ильменитовая руда, флотация, олеат натрия, пенная фракция, камерный продукт, концентрация и степень обогащения ильменита, кислотность среды, коллектор.

Аннотация

Изучена возможность обогащения ильменитовых руд месторождения Ха Тинь (Вьетнам) флотационным методом. Полученные при проведении исследований результаты могут быть использованы при промышленном обогащении ильменитовых руд. Образующиеся в процессе флотационного обогащения ильменитовые концентраты в дальнейшем применяются в процессе их дальнейшей химической переработки с получением титансодержащих материалов и сплавов. В настоящее время для обогащения ильменитовых руд месторождений Вьетнама используют гравитационные методы и электромагнитную сепарацию, однако эти методы не позволяют обеспечить полноту отделения ильменита от рутила и получить концентрат, удовлетворяющий требованиям качества на мировом рынке. Показано, что для получения ильменитовых концентратов с высоким содержанием и степенью обогащения флотацию проводят в течение 8 мин с добавлением 0.27-0.36 г/л олеата натрия при pH = 6-9. При изучении влияния кислотности среды на флотационные характеристики руды установлено, что наилучшие результаты достигаются в диапазоне pH от 5.5 до 7.0. В этих условиях концентрация олеата натрия составляет 0.36 г/л, а степень обогащения титана более 80%, при этом концентрация TiO₂ достигает ~45%. При изучении влияния концентрации титана в ильменитовой руде на эффективность флотационного обогащения показано, что при концентрации TiO₂ в руде более 25% степень обогащения титана практически не изменяется и не превышает 86%. Таким образом, процесс флотации можно использовать для дальнейшего обогащения концентратов, полученных методом электромагнитной сепарации. При этом получают обогащенные концентраты, удовлетворяющие предъявляемым требованиям, как по содержанию титана, так и по степени обогащения.

Введение

С развитием наукоемких технологий резко возрастает потребность в конструкционных материалах, работающих в критических условиях. К таким материалам относятся титановые сплавы. Создание технологических процессов, позволяющих обеспечить высокое качество титановых сплавов и минимальную их стоимость – ключевая задача технологий получения высокотехнологичных конструкционных материалов. Обогащение титановых руд – один из основных процессов, предшествующих их химической переработке, поскольку от состава полученных титановых концентратов зависит выбор способа химической переработки концентратов и стоимость полученных титановых сплавов.

Вьетнам находится на восьмом месте в мире по добыче титановых руд с крупнейшими запасами титана в мире ~7.6 млн. т. В месторождениях представлены коренные и россыпные руды (с примесью алюминия – дэлюви (deluvi) титановые руды), а также титан-циркониевые песчаные руды [1-5]. Запасы коренных титановых руд составляют ~4.8 млн. т в виде ильменита, однако они отличаются сложностью добычи и трудными условиями эксплуатации и последующей переработки. Содержание TiO₂ в ильмените составляет ~22%. Практически все месторождения титана, распространены в северных горных районах Вьетнама в основном в провинции Тай Нгуен.

Запасы дэлюви (deluvi) титановых руд составляют более 4 млн. т по ильмениту. Прибрежные титан-циркониевые руды представлены 2-мя типами, распределенными в слое красного песка и в отложениях серого песка. По имеющимся данным, общие запасы и прогнозные ресурсы титановой руды составляют около 650 млн. т. Основные ресурсы сосредоточены в основном в слое красного песка в регионах Ниньтхуан, Биньтхуан и Ба Риавунгтау, где сосредоточено около 599 млн. т в пересчете на концентрат. Средняя толщина слоя содержащего руду красного песка составляет около 85 м. Средняя концентрация диоксида титана ~0.7 %. В провинции Нинь тхуан оценочные ресурсы составляют 27 млн. т; в районе Туи Фонг (Бинь Туан) – прогнозные ресурсы 23.9 млн. т; Северный Фантьет (Биньтхуан) – оценочные ресурсы 476 млн. т; Южный Фантьет (Биньтхуан) – прогнозные ресурсы на уровне 56 млн. т; район Хам Тан (Бинь Тхуан) – расчетные ресурсы составляют 1.6 млн. т.

Несмотря на то, что титановых рудах провинции Тай-Нгуен содержание TiO_2 очень высокое (более 22 %), как и в других рудах, включая элюви (eluvi), дэлюви (deluvi), в титан-циркониевых песках на центральном побережье Вьетнама концентрация TiO_2 очень мала. Это особенно характерно для прибрежных песчанников [6-7]. Плотность тяжелых минералов – 4.3-5.2 г/см³, гранулометрический состав изменяется в пределах 0.047-0.25 мм. Основные тяжелые минералы – ильменит, рутил, циркон и монацит, концентрация которых изменяется в пределах 0.3-18.8%, в основном концентрация TiO_2 составляет от 0.3 до 5.2%. Остальное – нерудные компоненты (песок, глина и др.). В тяжелых минералах содержание Ti и Zr, составляет более 98%. Содержание ильменита ($FeTiO_3$) изменяется в пределах 50-90%, гранулометрический состав – 0.02-0.4 мм; содержание рутила (TiO_2): 0.7-2%, гранулометрический состав 0.04-0.29 мм; содержание циркона ($ZrSiO_4$): 3,6-19%, гранулометрический состав 0.02-0.2 мм. Соотношение между титановыми минералами (коэффициенты корреляции (релевантности) между полезными ископаемыми представлены в табл. 1. При среднем содержании полезных ископаемых в прибрежных песчанниках ~1.17%, концентрация ильменита – 81.5%, циркона – 17.9%, рутила – 2.2%, лейкоцена – 5.6%, анатаза – 2.4%.

Табл. 1. Коэффициенты корреляции (релевантности) между титановыми минералами в песчаных рудах Вьетнама [6]

Минерал	Ильменит	Анализ	Рутил	Лейкосин	Циркон	Монацит
Ильменит	1					
Анализ	0.78	1				
Рутил	0.76	0.91	1			
Лейкосин	0.51	0.27	0.29	1		
Циркон	0.79	0.80	0.75	0.52	1	
Монацит	0.86	0.77	0.74	0.34	0.7	1

На рис. 1 приведено расположение титановых месторождений во Вьетнаме.

Таким образом, целью проведения исследований в настоящей работе является изучение возможности применения процесса флотации для обогащения ильменитовых руд месторождения Ха Тинь (Вьетнам), выбор условий его проведения для обеспечения максимальной степени обогащения титансодержащих концентратов и отделения от минералов пустой породы с последующим разделением ильменитового и рутилового концентратов.

Для проведения исследований использовали ильменитовую руду месторождения Ха Тинь (Вьетнам), химический состав которой представлен в табл. 2.

Табл. 2. Концентрация компонентов в ильменитовой руде месторождения Ха Тинь (Вьетнам)

Элемент	Содержание, %	Элемент	Содержание, %
Кремний (Si)	4.52	Цирконий (Zr)	9.23
Титан (Ti)	20.66	Ниобий (Nb)	0.11
Ванадий (V)	0.044	Церий (Ce)	0.18
Железо (Fe)	15.62	Гафний (Hf)	0.17

В настоящее время опубликован ряд работ, в которых довольно подробно описано флотационное обогащение титансодержащих руд различного состава [8-30], но в таких рудах обычно титан представлен в виде одного минерала, поэтому задача обогащения состоит в его отделении от пустой породы. Во вьетнамских рудах обычно содержится как минимум два титановых минерала с циркониевыми минералами, поэтому задача обогащения не только в их отделении от пустой породы, но и в получении каждого минерала по отдельности.

Экспериментальная часть

Для проведения флотации взвешивали пробу руды массой 100 г и 1-2 г олеата натрия (NaOl). Полученную смесь перемешивали в течение 3-х минут. Воду для проведения флотации очищали на установке методом обратного осмоса. Во флотационную машину наливали 1 л воды с температурой 22-25 °С и добавляли предварительно подготовленную пробу. После перемешивания полученной смеси в течение 3-5 мин. во флотационную машину добавляли еще 2 л воды так, чтобы общий ее объем составил 3 л. Флотацию проводили при барботировании воздуха эжектирующим блоком импеллера. При вспенивании частицы руды переходят в пену, собирающуюся в верхней части аппарата, которую специальными лопатками удаляли в сборную емкость. По окончании флотации получали пенный и камерный продукты, из которых фильтрованием выделяли твердую фазу, высушивали и взвешивали. На рис. 2 показаны основные стадии процесса флотации: перемешивание пробы в воде, начало процесса, образование пены и удаление пенного продукта.

Для изучения влияния концентрации NaOl (c_{NaOl}) на эффективность обогащения использовали 4 образца руды массой по 20 г каждый, в которые добавляли 0.25; 0.5; 0.75 и 1.0 г NaOl. Полученные смеси перемешивали в течение 3-х мин. Затем каждый из образцов (по отдельности) помещали во флотационную машину и смешивали с водой (объем 3 л). При этом NaOl растворялся в воде с образованием пенной фазы. Концентрация NaOl в растворах составила 0.09; 0.18; 0.27 и 0.36 г/л соответственно. Исследования проводили при pH~7. Для корректировки кислотности среды использовали растворы 1 M NaOH и 0.8 M H₂SO₄.



Рис. 1. Карта расположения прибрежных россыпных месторождений Вьетнама:
2 – месторождение Ха Тинь

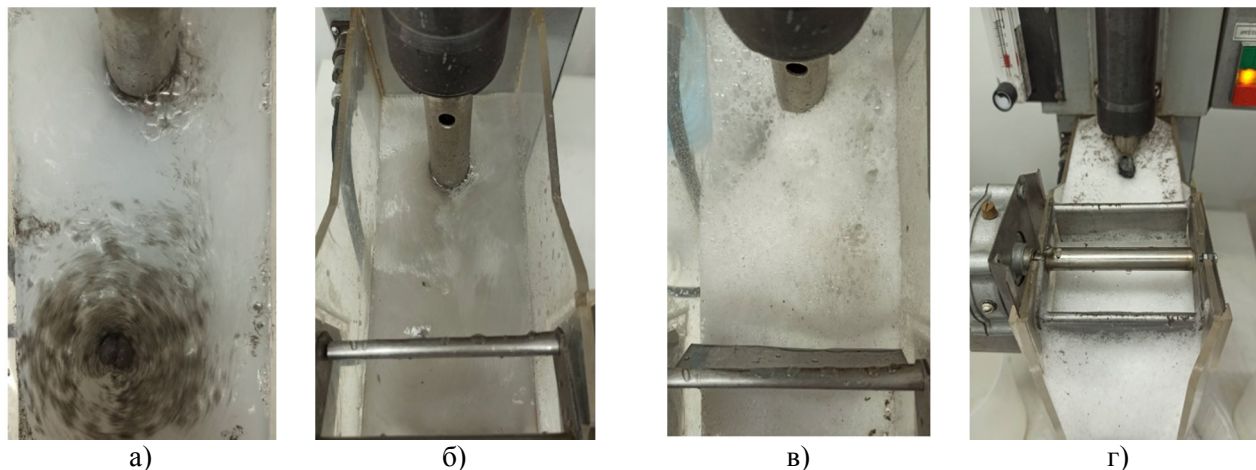


Рис. 2. Основные стадии процесса флотации: а) перемешивание пробы в воде; б) начало процесса; в) образование пены; г) удаление пенного продукта

Для определения времени флотации и выбора оптимального значения через 1, 3, 5, 8 10, 12 и 15 мин отбирали пробы пенной фракции и определяли в них количество твердой фазы, а также концентрации титана и железа.

От c_{NaOI} зависит количество (объем) образующейся пены время проведения флотации. Если c_{NaOI} слишком велика, то обогащение протекает быстро, но из-за слишком большого количества пены вместе с целевым компонентом в пену переходят примеси. В результате степень обогащения η_{Ti} будет высокой, а c_{TiO_2} – низкой. Если c_{NaOI} слишком мала, то количество пены снижается, время процесса сокращается, а его эффективность падает.

Кислотность среды сильно влияет на эффективность обогащения ильменитовых руд. Диапазон pH может изменяться в широких пределах в зависимости от месторождения и состава руды. На разных участках одного месторождения состав руды может изменяться, поэтому диапазон pH также будет различным. Необходимо выбрать оптимальную величину кислотности, при которой η_{Ti} будет максимальной. Кислотность влияет как на образование пенной фракции (добавление NaOI), так и на эффективность процесса за счет выделения титановых минералов в пену.

Количество NaOI, необходимое для проведения флотации, зависит от кислотности среды. При pH от 2 до 10 изучено влияние кислотности среды на показатели флотации.

Эффективность флотации сильно зависит от концентрации титана в руде. Чем она больше, тем выше степень обогащения и тем выше концентрация титана в полученном продукте. Это можно объяснить тем, что чем больше примесей находится в руде, тем большее влияние они оказывают на флотацию ильменита. В то же время эти примеси будут переходить в пенную фазу и всплывать вместе с ильменитом.

Результаты и их обсуждение

Изменение концентрации (c_{Ti}) и степени обогащения титана (η_{Ti}) во времени представлены на рис. 3. Показано, что флотация протекает за 8 мин. При этом концентрация TiO_2 в пенной фракции возрастает с 30.45 до 37.13%. Необходимо отметить, что количество обогащенной фракции со временем уменьшается [31].

Наибольшая η_{Ti} , равная 83 %, достигается через 10 минут. Однако c_{Ti} в пенной фракции постепенно снижается из-за попадания в нее примесей. Таким образом, оптимальное время флотации изменяется от 5 до 10 мин., а наилучшие показатели достигаются через 8 мин. [32].

На рис. 4 показаны результаты изменения c_{Ti} и η_{Ti} в пенной фракции от c_{NaOI} . В растворе с c_{NaOI} 0,09 г/л количество пены очень мало. На поверхности водной фазы образуется тонкая пленка пены. Частицы руды, переходящие из водного раствора в пенную пленку, не удерживаются в ней и оседают обратно в водную фазу. Из-за плохого разделения количество примесей в пене увеличивается. В нее переходит не более 24% твердой фазы от исходного ее количества, а η_{Ti} не превышает 20%.

При увеличении c_{NaOI} до 0.18 г/л объем пенной фракции возрастает. Частицы руды начинают удерживаться слоем пены. Время флотации не превышает 3-х мин. Через 3 мин η_{Ti} достигла 61%, а содержание твердой фазы составило ~36%. С увеличением c_{NaOI} до 0.27 г/л и 0.36 г/л образуется достаточное для флотации количество пенной фракции, которое не изменяется в течение 10 мин. Скорость образования пены достаточно высока, η_{Ti} выше 80%, а содержание твердой фазы превышает 37%.

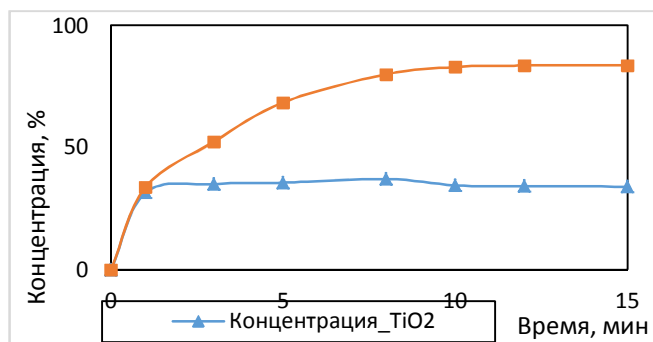


Рис. 3. Влияние времени на эффективность флотации

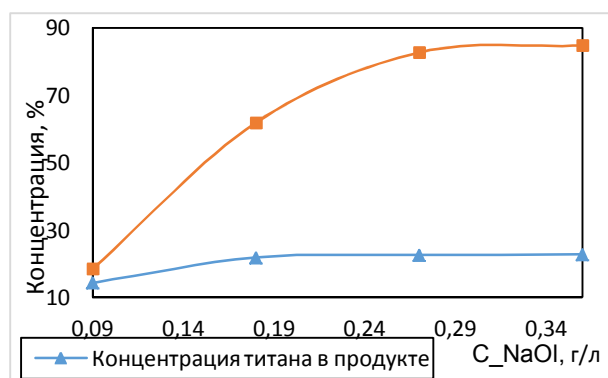


Рис. 4. Влияние концентрации NaOI на эффективность флотации

При изучении влияния кислотности среды на основные показатели процесса флотации показано, что в нейтральной и щелочной средах при $pH = 6-9$ (рис. 5) для обеспечения высокой скорости образования пены в раствор объемом 3 л достаточно добавить 1.0 г NaOI на 3 л раствора, а с увеличением кислотности среды при $pH = 5$ и 4 количество NaOI возрастает до 2.5 г и 3.0 г соответственно [33].

Образование пены начинается только при $pH = 3$. Чем ниже pH среды, тем больше NaOI необходимо добавлять в раствор. Таким образом флотацию необходимо проводить при c_{NaOI} не менее 0.27 г/л в слабокислой или нейтральной средах (при $pH = 5-7$). Степень обогащения титана может достигать ~80% при c_{TiO_2} в пенной фракции ~37% [34].

При проведении исследований в нейтральной и щелочной средах c_{NaOI} составляла 0.36 г/л. В кислой среде c_{NaOI} (рис. 5) увеличивают до 0.72-0.108 г/л (2.0-3.0 г NaOI на 3 л раствора). Степень обогащения титана (рис. 6) в диапазоне pH 4-8 изменяется от 5 до 55% проходя через максимум. При этом при $pH \sim 7$ η_{Ti} приобретает максимальное значение – 85%. При $pH > 7.0$ η_{Ti} резко снижается, а при $pH = 8.0$ флотация не протекает, хотя количество образующейся пены очень велико. Поэтому наилучшие показатели флотации наблюдаются при $pH = 7.0$. В этих условиях $\eta_{Ti} \sim 85\%$, а концентрация TiO_2 возрастает с 30 до 45% [35].

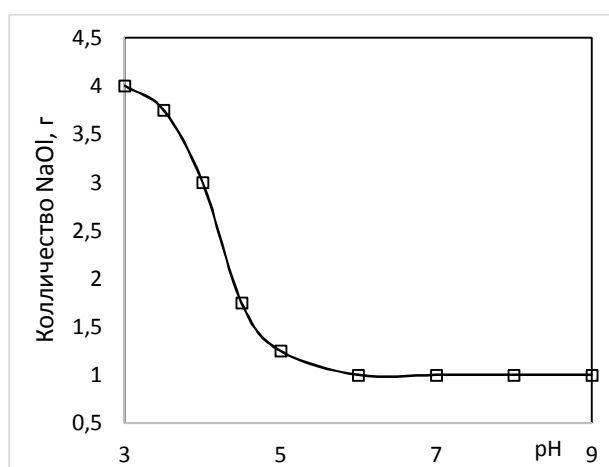


Рис. 5. Влияние кислотности среды на количество NaOI в процессе флотации

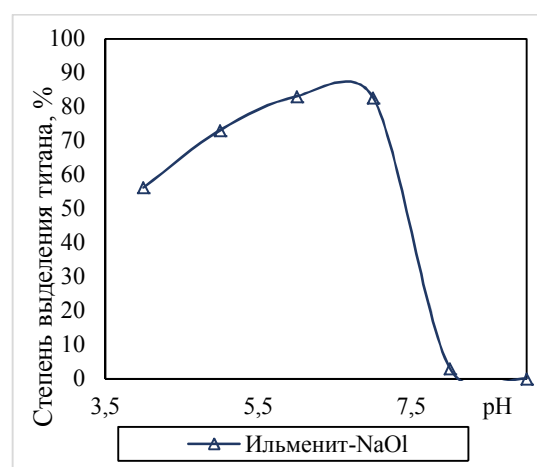


Рис. 6. Влияние pH на степень обогащения титана

Таким образом, оптимальное значение кислотности среды находится в диапазоне pH от 5.5 до 7.0. При этом c_{NaOI} равна 0.36 г/л, η_{Ti} более 80 %, а концентрация TiO_2 достигает ~45%.

Эффективность флотации возрастает при c_{TiO_2} в руде более 20% и η больше 80%. При этом c_{TiO_2} в обогащенной фракции достигает ~36%. На рис. 6 показаны зависимости изменения η от c_{TiO_2} в исходной руде. Исследования проведены в диапазоне $pH = 3.4-7.0$ в течение 10 мин. Концентрация NaOI в исходном растворе составляла 0.33 г/л (или 1 г/3 л).

Показано, что при c_{Ti} в руде 25 % и выше η_{Ti} изменяется незначительно и составляет ~86%. При c_{Ti} в руде менее 25% c_{TiO_2} в обогащенной фракции возрастает гораздо быстрее. Например, при c_{TiO_2} в исходной руде менее 40% степень обогащения в пенной фракции возросла с 38.91 до 43.60 (~ на 5%). При c_{TiO_2} в руде более 40% c_{TiO_2} в обогащенной фракции увеличивалась гораздо медленнее, хотя η была высокой и достигла ~86%. Это можно объяснить высокой концентрацией FeO в руде, при которой ее флотационные свойства ухудшаются [36].

Заключение

При проведении обогащения вьетнамских ильменитовых руд флотационным методом показана принципиальная возможность использования этого метода для получения как высокой концентрации титановых минералов в пенном продукте, так и высокой степени обогащения исходной руды. Олеат натрия можно использовать в качестве вспенивателя (коллектора, собирателя) поскольку при его применении обеспечиваются необходимые показатели флотации. Кислотность среды сильно влияет на показатели процесса: в нейтральных

средах титансодержащие минералы хорошо отделяются от пустой породы, однако для их последующего разделения, например, для отделения ильменита от рутила, необходимо проведение более детальных исследований с добавлением активаторов, промоторов и блокаторов процесса, обеспечивающих эффективность разделения.

Англоязычная версия данной статьи опубликована в журнале *Butlerov Communications A* [37].

Выводы

1. Олеат натрия обеспечивает эффективность флотации в концентрационном диапазоне от 0.27 до 0.36 г/л при исследовании по обогащению ильменитовых руд месторождения Ха Тинг (Вьетнам).
2. При изучении влияния кислотности среды на показатели флотации ильменитовых руд месторождения Ха Тинг (Вьетнам) показано, что при использовании в качестве собирателя олеата натрия (NaOl) диапазон изменения pH среды составляет 5-7. С увеличением кислотности среды возрастает концентрация NaOl; при pH среды меньше 2 процесс флотации невозможен, поскольку не происходит образования пены.
3. Продолжительность проведения процесса флотации при обогащении ильменитовых руд месторождения Ха Тинг (Вьетнам) изменяется в пределах 5-10 мин., а наилучшие показатели наблюдаются через 8 мин. после осуществления процесса.
4. С степенью обогащения ильменитовых руд месторождения Ха Тинг (Вьетнам) сильно зависит от концентрации TiO_2 в исходной руде. При c_{TiO_2} (выше 25%) степень обогащения меняется незначительно, поскольку уже в этих условиях она составляет ~86%. При c_{TiO_2} (ниже 25%) степень обогащения возрастает в значительной степени (не менее чем на 5%).

Благодарности

Авторы статьи выражают признательны директору Инженерной ядерно-технологической школы за предоставление возможности проведения вышеописанных исследований в лабораториях с использованием современного высокотехнологичного оборудования.

Литература

- [1] Кюи Нго Чан Тхиен, Кириченко Ю.В. Минеральный потенциал подводных месторождений в южно-китайском море Вьетнама. *Горная промышленность*. **2020**. №1. С.140-143. DOI: <http://dx.doi.org/10.30686/1609-9192-2020-1-140-143>
- [2] B.X. Nam, H.S. Giao. Status of development orientations for mining titanium placers in Vietnam. *Горные науки и технологии*. **2016**. No.1. P.40-50. DOI: 10.17073/2500-0632-2016-1-40-50
- [3] Кириченко Ю.В., Каширский А.С., Иващенко Г.С. Анализ экологического воздействия разработок подводных месторождений твердых полезных ископаемых. *Горная промышленность*. **2019**. №3. С.92-97. DOI: 10.30686/1609-9192-2019-3-145-92-97
- [4] Nassgewinnung B: Der Nassabbau. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*. **2008**. https://doi.org/10.1007/978-3-540-49695-3_5
- [5] Нурок Г.А. Технология добычи полезных ископаемых со дна озер морей и океанов. М.: Недра. **1979**. 381с. <https://www.twirpx.org/file/108897/>
- [6] V.T. Nguyen, V.T. Tran. Industrial-scale titanium-zircon placer potential in the red sand dunes of the Phan Thiet formation in South Trung Bo coastlines. *Journal of Geology, Series A*. Hanoi, Vietnam. **2008**. Iss.308. P.18-24.
- [7] T.T. Dang, X.N. Bui. Research of the process parameters and suitable mining sequence of ilmenite ore(Ti) in coastal sand dunes. *Journal of Mining Industry*. Hanoi, Vietnam. **2008**. Iss.6. P.22-24.
- [8] H. Zhang, J. Zeng, H. Xie, C. Guan, L. Chen. Enhanced separation for ilmenite tailings with a novel HGMS-flotation process. *Separation science and technology*. **2020**. Vol.55. No.4. P.752-760. <https://doi.org/10.1080/01496395.2019.1567546>
- [9] K. Shu, L. Xu, H. Wu, S. Fang, Z. Wang, Y. Xu, Z. Zhang. Effects of ultrasonic pre-treatment on the flotation of ilmenite and collector adsorption. *Minerals Engineering*. **2019**. Vol.137. No.15. P.124-132. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.04.001>

- [10] J. Zhaia, P. Chena, W. Suna, W. Chenc, S. Wanc. A review of mineral processing of ilmenite by flotation. *Minerals Engineering*. **2020**. Vol.157 Article 106558. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106558>
- [11] J. Caia, J. Deng, S. Wena, Y. Zhanga, D. Wua, H. Luo, G. Chengd. Surface modification and flotation improvement of ilmenite by using sodium hypochlorite as oxidant and activator. *Journal of Materials Research and Technology*. **2020**. No.9(3). P.3368-3377. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.01.031>
- [12] Y. Du, Q. Meng, Z. Yuan, X. Zhao, Y. Xu. Impact of acid surface pretreatment on the flotation of ilmenite and titanite and its functional mechanism. *Powder Technology*. **2020**. Vol.376. P.622-630. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.08.057>
- [13] K.P. Galvin, J. Zhou, A.J. Price, P. Agrwal, S.M. Iveson. Single-stage recovery and concentration of mineral sands using a REFLUXTM Classifier. *Minerals Engineering*. **2016**. Vol.93. P.32-40. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.04.010>
- [14] X. Guo, S. Dai, Q. Wang. Influence of different comminution flowsheets on the separation of vanadium titanite-magnetite. *Minerals Engineering*. **2020**. Vol.149. P.106-268. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106268>
- [15] X. Guo, S. Cui, S. Dai et al. Investigation of microcrack formation in vanadiumtitanium magnetite using different crushing processes. *J. Southern African Instit. Min. Metall.* **2019**. Vol.119. P.811-816.
- [16] G.A. Shevchenko, V.G. Shevchenko, V.A. Baranov, V.N. Spassky. The enrichment technology of slag from metallurgical processing of copper ore concentrate. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. **2019**. Vol.28(3). P.537-545. <https://doi.org/10.15421/111950>
- [17] Z. Yuan, X. Zhao, Q. Meng, Y. Zhang, L. Li. Study on surface magnetization recover ilmenite from titanite using surfactant sodium oleate. *Separation Science and Technology*. **2020**. Vol.55. No.15. P.2812-2821. <https://doi.org/10.1080/01496395.2019.1641522>
- [18] S. Fang, L. Xu, H. Wu, J. Tian, Z. Lu, W. Sun, Y. Hu. Adsorption of Pb(II)/benzohydroxamic Acid Collector Complexes for Ilmenite Flotation. *Miner. Eng.* **2018**. Vol.126. P.16-23. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.06.022>
- [19] Y. Yang, L. Xu, Y. Liu, Y. Han. Flotation Separation of Ilmenite from Titanite Using Mixed Collectors. *Sep. Sci. Technol.* **2016**. Vol.51. P.1840-1846. <https://doi.org/10.1080/01496395.2016.1183678>
- [20] J. Tian, L. Xu, Y. Yang, J. Liu, X. Zeng, W. Deng. Selective Flotation Separation of Ilmenite from Titanite Using Mixed Anionic/cationic Collectors. *Int. J. Miner. Process.* **2017**. Vol.166. P.102-107. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2017.07.006>
- [21] Q. Meng, Z. Yuan, L. Yu, Y. Xu, Y. Du, C. Zhang. Selective Depression of Titanite in the Ilmenite Flotation with Carboxymethyl Starch. *Applied Surface Science*. **2018**. Vol.440. P.955-962. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.01.234>
- [22] J. Shibata, D. Fuerstenau. Flocculation and Flotation Characteristics of Fine Hematite with Sodium Oleate. *Int. J. Miner. Process.* **2003**. Vol.72. P.25-32. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(03\)00085-1](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(03)00085-1)
- [23] C. Liu, Q. Feng, G. Zhang, W. Ma, Q. Meng, Y. Chen. Effects of Lead Ions on the Flotation of Hemimorphite Using Sodium Oleate. *Miner. Eng.* **2016**. Vol.89. P.163-167. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.02.002>
- [24] D. Horta, M.B. Mello Monte, F.L. Salles Leal. The Effect of Dissolution Kinetics on Flotation Response of Apatite with Sodium Oleate. *Int. J. Miner. Process.* **2016**. Vol.146. P.97-106. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2015.12.003>
- [25] P.J. Thistlethwaite, M.S. Hook. Diffuse Reflectance Fourier Transform Infrared Study of the Adsorption of Oleate/Oleic Acid onto Titania. *Langmuir*. **2000**. Vol.16. P.4993-4998. <https://doi.org/10.1021/la991514i>
- [26] M. Irannajad, A. Mehdilo, O.S. Nuri. Influence of Microwave Irradiation on Ilmenite Flotation Behavior in the Presence of Different Gangue Minerals. *Sep. Purif. Technol.* **2014**. Vol.132. P.401-412. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.05.046>
- [27] W. Wang, H. Wang, Q. Wu, Y. Zheng, Y. Cui, W. Yan, J. Deng, T. Peng. Comparative Study on Adsorption and Depressant Effects of Carboxymethyl Cellulose and Sodium Silicate in Flotation. *J. Mol. Liq.* **2018**. Vol.268. P.140-148. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.07.048>
- [28] X. Yang, P. Roonasi, A. Holmgren. A Study of Sodium Silicate in Aqueous Solution and Sorbed by Synthetic Magnetite Using in Situ ATR-FTIR Spectroscopy. *J. Colloid Interface Sci.* **2008**. Vol.328. P.41-47. DOI: 10.1016/j.jcis.2008.08.061
- [29] C. Van Oss, R. Giese, P. Costanzo. DLVO and Non-DLVO Interactions in Hectorite. *Clay Clay Miner.* **1990**. Vol.38. P.151-159. doi:10.1346/CCMN.1990.0380206
- [30] Y. Hu, J. Dai. Hydrophobic Aggregation of Alumina in Surfactant Solution. *Miner. Eng.* **2003**. Vol.16. P.1167-1172. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2003.07.018>

- [31] Ле Ш.Х., Киеу Т.Б., Карелин В.А. Флотационное обогащение ильменитовых руд из Вьетнама. Химия и химическая технология в XXI веке: материалы XXII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых имени выдающихся химиков Л.П. Кулёва и Н.М. Кижнера, посвященной 125-летию со дня основания Томского политехнического университета (г. Томск, 17-20 мая 2021 г.). Томский политехнический университет. *Томск: Изд-во Томского политехнического университета. 2021. Т.2. С.118.*
- [32] Ле Шон Хай, Карелина Н.В. Особенности обогащения ильменитовых концентратов из Вьетнама. Химия и химическая технология в XXI веке материалы XXI Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых имени выдающихся химиков Л.П. Кулёва и Н.М. Кижнера, посвященной 110-летию со дня рождения профессора А.Г. Стромберга, 21-24 сентября 2020 г., г. Томск. Национальный исследовательский Томский политехнический университет. *Томск: Изд-во ТПУ. 2020. С.457-458.*
- [33] Ле Шон Хай, Карелина Н.В. Ильменитовая руда во Вьетнаме и особенности обогащения ильменитовых концентратов из Вьетнама. Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов сборник докладов X Всероссийской научно-практической конференции, Томск, 22-24 апреля 2020 г. Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). *Томск: Изд-во ТПУ. 2020. С.125-130.*
- [34] Ле Шон Хай, Карелина Н.В. Переработка ильменитовых концентратов из Вьетнама. Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине. Российский и международный опыт подготовки кадров сборник тезисов докладов X Международной научно-практической конференции, г. Томск, 09-11 сентября 2020 г.: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Инженерная школа ядерных технологий, Российский фонд фундаментальных исследований; ред. кол. И.В. Шаманин, В.П. Кривобоков, А.Г. Горюнов, В.А. Карелин. *Томск: Ветер. 2020. С.137-138.*
- [35] Ле Шон Хай, Карелина Н.В. Флотационное обогащение титансодержащих песков из Вьетнама. Изотопы: технологии, материалы и применение сборник тезисов докладов VI Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Томск, 26-29 октября 2020 г.: Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). *Томск: ТПУ. 2020. С.77.*
- [36] Le Hai Son, Le Thi Mai Huong, N.V. Karelina, V.A. Karelin. Research of the fluorination process of Rutile concentrate. *Vietnam conference on nuclear science and technology. Long City, Quang Ninh, Vietnam. August 07-09. 2019. P.231-232.*
- [37] Son Hai Le, Thuan Bach Kieu, V.A. Karelin, I.I. Zherin, N.V. Karelina, and A.A. Smorokov. Application of the flotation process for the enrichment of ilmenite ores from Vietnam. *Butlerov Communications A. 2021. Vol.2. No.3. Id.11. DOI: 10.37952/ROI-jbc-A/21-2-3-11*

The English version of the article have been published in the international edition of the journal

Butlerov Communications A
Advances in Organic Chemistry & Technologies

The Reference Object Identifier – ROI-jbc-A/21-2-3-11

The Digital Object Identifier – DOI: 10.37952/ROI-jbc-A/21-2-3-11

**Application of the flotation process for the enrichment
of ilmenite ores from Vietnam**

© **Son Hai Le, Thuan Bach Kieu, Vladimir A. Karelin,*⁺ Ivan I. Zherin,
Nadezhda V. Karelina, and Andrey A. Smorokov**

*Department of the Nuclear Fuel Cycle of the School of Nuclear Technology Engineering. National Research
Tomsk Polytechnic University. Lenin Ave., 30, Tomsk, 634050. Tomsk Region. Russia.*

Phone: +7 (3822) 701777 Ext. 2269. E-mail: vakarelin@tpu.ru

^{*}Supervising author; ⁺Corresponding author

Keywords: ilmenite ore, flotation, sodium oleate, foam fraction, chamber product, concentration and degree of concentration of ilmenite, acidity of the medium, collector.

Abstract

Possibility of ilmenite enrichment of Ha Tinh deposit (Vietnam) ores by flotation method has been studied. Results obtained during the research can be used for industrial dressing of ilmenite ores. Ilmenite concentrates formed in the flotation concentration process are further used in process of their further processing to obtain titanium-containing materials and alloys. At present, gravity methods and electromagnetic separation are used to enrich ilmenite ores of Vietnamese deposits, however, these methods do not allow to ensure completeness of ilmenite separation from rutile. It is shown that to obtain ilmenite concentrates with a high content and degree of enrichment, flotation is carried out for 8 minutes with the addition of 0.27-0.36 g/l of sodium oleate (NaOl) at pH = 6-9. When studying the effect of medium acidity on the flotation characteristics of ore, it was found that the best results are achieved in pH range 5.5-7.0. Under these conditions, NaOl concentration is 0.36 g/l, and titanium enrichment degree is more than 80%, while the concentration TiO₂ reaches ~45%. When studying of titanium concentration effect in ilmenite ore on flotation concentration efficiency, it was shown that when the concentration of TiO₂ in the ore is more than 25%, the titanium concentration degree does not practically change and does not exceed 86%. Thus, flotation process can be used for further enrichment of concentrates obtained by electromagnetic separation method. At the same time, enriched concentrates are obtained that meet requirements for both the titanium content and the degree of enrichment.