

Т.А. Олейник<sup>(1)</sup>, зав. кафедрой, д.т.н., профессор  
Т.П. Гурьянова<sup>(2)</sup>, зав. лабораторией, к.т.н.  
Г.А. Колобов<sup>(3)</sup>, профессор, к.т.н.  
А.И. Гамалинский<sup>(4)</sup>, зам. гл. инженера проекта, к.т.н.  
И.А. Гамалинский<sup>(4)</sup>, гл. инженер проекта  
Ю.В. Поплавский<sup>(2)</sup>, ст. научн. сотрудник  
В.В. Криворучко<sup>(2)</sup>, мл. научн. сотрудник

## РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ДОБЫЧИ, ОБОГАЩЕНИЯ И ПЕРЕРАБОТКИ ТИТАНОВОГО СЫРЬЯ В МИРЕ И УКРАИНЕ

<sup>(1)</sup> *Криворожский государственный технический университет,*

<sup>(2)</sup> *Государственный научно-исследовательский и проектный институт титана, г. Запорожье,*

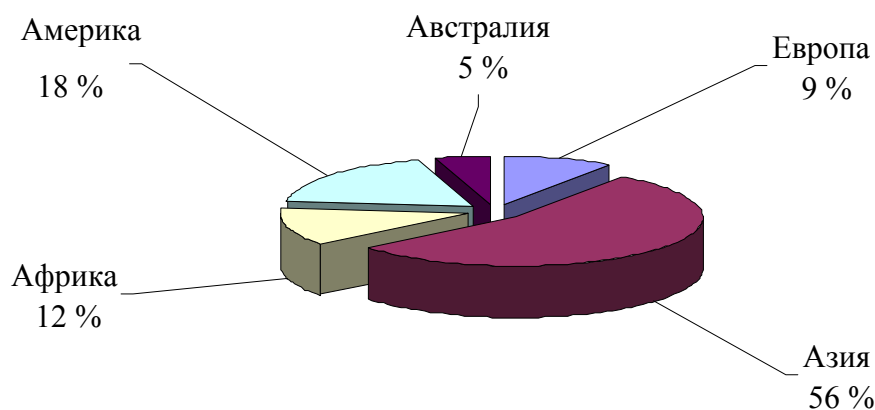
<sup>(3)</sup> *Запорожская государственная инженерная академия,*

<sup>(4)</sup> *ГП «Государственный институт по проектированию предприятий горнорудной промышленности», г. Кривой Рог*

Приведені дані про сучасний розвиток технологій здобичі, збагачення і переробки титанової сировини в світі та Україні, а також основні вимоги до ільменітового концентрату для подальшої переробки сульфатним або хлорним способами з одержанням пігментного двооксиду титану або губчастого титану. Приведено схеми збагачення титанцирконового піску Вольногорського ГГМКа та ільменітових пісків Іршанського ГОКа. Запропоновано альтернативну схему збагачення ільменітового концентрату шляхом магнітного фракціонування з одержанням незміненого та зміненого ільменитов.

Приведены данные о современном развитии технологий добычи, обогащения и переработки титанового сырья в мире и в Украине, а также основные требования к ильменитовому концентрату для последующей переработки сульфатным или хлорным способами с получением пигментного диоксида титана или губчатого титана. Приведены действующие схемы обогащения титанцирконового песка Вольногорского ГГМКа и ильменитовых песков Иршанского ГОКа. Предложена альтернативная схема обогащения ильменитового концентрата путем магнитного фракционирования с получением неизмененного и измененного ильменитов.

Сырьевую базу титановой промышленности мира составляют месторождения трех геолого-промышленных типов: современные и древние прибрежно-морские и аллювиальные или комплексные ильменит-рутил-циркониевые россыпи ильменита; коренные магматические месторождения ильменит-магнетитовых, ильменит-гематитовых и ильменит-рутиловых руд в габбро-анортозитах; анатаз-перовскит-апатитовых рудах в латеритных корах выветривания карбонатитов. Распределение запасов диоксида титана в мире показано на рис. 1.



**Рисунок 1** – *Распределение запасов диоксида титана в мире*

Ильменит-магнетитовые и ильменит-гематитовые руды коренных месторождений составляют основу минерально-сырьевой базы титановой промышленности Канады, КНР и Норвегии. Месторождения коры выветривания карбонатитов известны и разрабатываются только в Бразилии, где свыше 80 % запасов титана разведано в месторождениях указанного типа, в частности 50 % – в больших анатаз-апатит-пиро-хлоровых месторождениях Тапира и Каталана. В остальных странах основные запасы титановых минералов размещены в россыпных, преимущественно комплексных месторождениях.

Наибольшими в мире запасами титана, которые превышают 100 млн. т диоксида титана, обладает Австралия. Ее запасы сконцентрированы в россыпных прибрежно-морских комплексных ильменит-рутил-циркониевых месторождениях. Россыпи располагаются вдоль юго-западного и восточного побережья континента и на прибрежных островах. В настоящее время основные залежи восточного побережья или в значительной степени истощены, или законсервированы в соответствии с принятым законодательством об охране окружающей среды. Основные районы добычи сконцентрированы на западном побережье. Здесь, в южной части, расположено наибольшее эксплуатируемое месторождение Енибба, общие запасы которого составляют 20 млн. т, подтвержденные – 12,9 млн. т диоксида титана. Среднее содержание рудных минералов достигает 10 %, из них 37 % составляет ильменит, 32 % – циркон, 7 % – рутил.

В ЮАР, которая занимает третье место в мире по промышленным запасам титана, его большая часть размещена в многочисленных комплексных прибрежно-морских россыпных ильменит-лейкоксен-рутиловых месторождениях, расположенных на восточном и западном побережьях континента. В настоящее время разрабатываются россыпи восточного побережья. Среднее содержание тяжелой фракции в песках достигает 9 %. Дюнные россыпи месторождения Ричардс-бей простираются узкой полосой вдоль берега длиной 17 км и в ширину, в среднем, 2 км. Подтвержденные запасы минералов тяжелой фракции оцениваются в 700...750 млн. т.

В США практический интерес представляют собой россыпные прибрежно-морские месторождения побережья Флориды и Вирджинии, комплексные по минеральному составу. Наибольшим в США россыпным месторождением является Трейл-Ридж. Активно эксплуатируется и месторождение Олд-Хистори в штате

Вирджиния, содержащее высококачественные руды, общие запасы которых составляют 73 млн. т (8,1 % тяжелых минералов), а подтвержденные – 27 млн. т (12 % тяжелых минералов).

В Индии основная часть запасов титана сконцентрирована в комплексных преимущественно ильменит-циркониевых россыпных месторождениях Чаввара и Манавалакуручи. Рудные пески месторождения Чаввара содержат до 30 % ильменита (до 60 %  $TiO_2$ ). Месторождение Манавалакуручи содержит 17...20 % рудных минералов, содержание  $TiO_2$  в ильмените – 55 %.

Запасы аллювиальных, дельтовых и прибрежно-морских россыпей Сьерра-Леоне небольшие, но размещены преимущественно в рутиловых россыпях (около 18 % мировых запасов рутила). Пески считаются одними из самых богатых в мире (содержание тяжелых минералов в них достигает 60...70 %) [1].

Российская Федерация (РФ) владеет значительными разведанными запасами титана, которые размещены как в рудных, так и россыпных месторождениях. Государственным балансом запасов полезных ископаемых РФ учтены запасы двадцати трех месторождений титана. На долю коренных месторождений приходится 97 % балансовых запасов, на долю семи россыпных – около 3 %. По типам руд запасы месторождений распределяются таким образом: ильменит-титаномагнетитовые руды – 33,6 %, апатит-нефелиновые руды – 8 %, титаномагнетитовые – 3,2 %, лопаритовые – 2,4 %. В РФ известны месторождения титаномагнетитовых руд в Карелии, на Кольском полуострове и на Урале, в Западной и Восточной Сибири, на Дальнем Востоке. Содержание и соотношение титана, ванадия и железа в них изменяется в широких пределах: они могут быть существенно титановыми или существенно железованадиевыми. Промышленную ценность месторождений повышает наличие ванадия. Кроме того, в ряде месторождений обнаружены извлекаемые количества скандия, меди, кобальта, никеля, золота, платины, палладия и др. [2].

Наиболее яркими примерами освоения и промышленного использования титаномагнетитовых руд за рубежом являются месторождения Бушвельдского массива (ЮАР), Лак-Тио (Канада), Паньжихуань (КНР) и др. Качество титаномагнетитовых руд основных коренных месторождений мира и Украины приведены в табл. 1.

За рубежом для получения товарных титановых шлаков используются богатые по титану руды (содержание  $TiO_2$  > 30 %) канадских месторождений, а также месторождений ЮАР и КНР. Титаномагнетитовые руды применяются только для извлечения железа и ванадия. Руды, которые содержат свободный ильменит, подвергаются специальному обогащению для его извлечения.

Украина является второй основной страной СНГ по запасам титана. Разведанные запасы титана составляют 40,5 % от общих запасов стран СНГ, запасы циркония – 19,1 %. Основные запасы приурочены к большим ильменит-рутил-циркониевым россыпным месторождениям – Малышевскому и Иршинской группы россыпей. Значительные запасы титана сосредоточены в коре выветривания и коренных рудах наибольшего в СНГ Стремгородского ильменит-титан-apatит-магнетитового месторождения (30,8 % от общих запасов СНГ). В настоящее время эксплуатируются только россыпные титан-циркониевые месторождения (Вольногорский горно-металлургический комбинат и Иршинский ГОК).

Следует отметить, что по своим качественным характеристикам месторождения титана в странах СНГ, в целом, уступают зарубежным аналогам: содержание диоксида титана в рудах и песках в 1,5...3,0 раза ниже, чем в зарубежных месторождениях. Содержание ильменита в разрабатываемых месторождениях

Украины колеблется от 34,8 кг/м<sup>3</sup> в Малышевском до 75,7 кг/м<sup>3</sup> в месторождениях Иршинской группы. Для сравнения: в месторождении Ричардс-бей (ЮАР) содержится 50 кг/м<sup>3</sup> ильменита, месторождении Енниба в Австралии – 37 кг/м<sup>3</sup>, месторождении Чаварра в Индии – 122 кг/м<sup>3</sup>.

**Таблица 1** – Качество титановых руд основных коренных месторождений мира и Украины

| Месторождение                             | Содержание, % |             |             |
|-------------------------------------------|---------------|-------------|-------------|
|                                           | $Fe_{общ}$    | $TiO_2$     | $V_2O_5$    |
| <i>Мировые месторождения</i>              |               |             |             |
| Бушвельдский комплекс (ЮАР)               | 53...57       | 13,0        | 1,4...1,9   |
| Аллард-Лейк (Канада)                      | 40            | 34,0        | 0,30        |
| Паньчжихуань (КНР)                        | 32            | 10,0        | 0,32        |
| Ченджень (КНР)                            | 35,8          | 8,9         | 0,37        |
| Тахароа (Новая Зеландия)                  | 22,0          | 4,3         | 0,14        |
| Барамби (Австралия)                       | 26            | 10,0...15,0 | 0,70        |
| Тахавус (США)                             | 34            | 19,0        | 0,45        |
| Отонмяки и Муста-Вааре (Финляндия)        | 22            | 8,3         | 0,33        |
| Телнес (Норвегия)                         | 5             | 18,0        | н/д         |
| <i>Месторождения Российской Федерации</i> |               |             |             |
| Гремяха-Вирмес (Юго-Восточный участок)    | 35            | 10...13     | 0,30        |
| Большой Сейим                             | 17,9          | 8,4         | 0,10        |
| Куранахское                               | 39            | 14,1        | 0,45        |
| Кручининское                              | 15...18       | 8,4         | до 0,1      |
| Чинейское                                 | 33,5          | 6,5         | 0,52        |
| Медведевское                              | 14,7          | 7,0         | 0,04...0,26 |
| Гусевогорское                             | 16,5          | 1,2         | 0,14        |
| Подлисанское                              | 24,7          | 8,0         | 0,10        |
| <i>Месторождения Украины*</i>             |               |             |             |
| Стремигородское                           | 14...15       | 6,5...7,5   | 0,10        |
| Федоровское                               | 20            | 6,5         | 0,085       |
| Носачевское                               | -             | 5,5         | -           |

\* кроме ильменита в руде содержится апатит в соотношении 1 : 3

В Украине переработку ильменитовых концентратов титановых месторождений с получением пигментного диоксида титана ведут ЗАО «Крымский титан» и ОАО «Сумыхимпром», а также производитель металлического титана КП «Запорожский титано-магний комбинат». К предприятиям титанового комплекса относятся и арендованные ЗАО «Крымский титан» у государства Иршинский ГОК и Вольногорский ГГМК.

Государственная компания «Сумыхимпром» специализируется на выпуске диоксида титана, серной кислоты, желтых и красных железооксидных пигментов, сложных минеральных удобрений и коагулянтов для очистки воды.

По данным «Укррудпром», на долю диоксида титана приходится около 90% общего объема продажи продукции предприятия ЗАО «Крымский титан». Оно выпускает также такие виды химической продукции, как железооксидные пигменты, минеральные удобрения, серную кислоту, сульфид алюминия, алюминат натрия, жидкое стекло, железный купорос, фосфогипс.

Установленные мощности украинского производства находятся на уровне предприятий Франции, Финляндии, Мексики, но уступают в 2,0...2,5 раза

соответствующим показателям таких лидеров рынка, как Австралия, Великобритания, Япония.

Оба украинских производителя диоксида титана продолжают продвигать новые марки продукции, при этом усиливается их экспортная активность. Так, ОАО «Сумыхимпром» достигнута договоренность о расширении продажи продукции на рынках США и России.

Но все более важной проблемой становится конкуренция с китайскими поставщиками диоксида титана. В РФ ниша, которую могли бы занимать украинские поставщики, принадлежит фирмам типа «*Yillong CG*», а в США доля китайских фирм уже давно стала доминирующей. Кроме того, усиливается активность продуцентов пигментов – заменителей  $TiO_2$ . Так, немецкая компания «*BASF*» расширяет рекламирование своего пигмента «Литопон», а некоторые японские, турецкие и европейские компании занимаются производством белил из микрограмора.

Для оценки состояния производства диоксида титана в мире и в нашей стране необходимо, прежде всего, проанализировать состояние добычи и обогащения руд. Отработка запасов россыпных месторождений на действующих предприятиях нашей страны, а также и за рубежом выполняется открытым способом без взрыхления горной массы буровзрывными работами. Для выемки горных пород применяют одноковшовые или роторные экскаваторы. На месторождениях подобного типа, как правило, применяется внутреннее отвалообразование, которое выполняется или по транс-портной, или по бестранспортной схеме. Доставка руды на обогатительную фабрику осуществляется разными видами транспорта: автомобильным, конвейерным или гидравлическим. В России для отработки отдельных месторождений такого типа рекомендуется метод скважинной гидродобычи, как самостоятельный, так и в объединении с открытой разработкой. Но метод скважинной гидродобычи имеет существенный недостаток – частичная выемка (20...30 %) запасов. Остаток (70...80 %) или добывают по традиционным системам подземной разработки, или разработку откладывают до тех пор, пока не будут созданы принципиально новые и более эффективные горнотехнические системы.

В Украине карьер Вольногорского ГГМК, который перерабатывает руду Малышевского месторождения, отрабатывается двумя участками: участок «Север» и участок «Юг». На участках карьеров применяется комбинированная система разработки. Перед фронтом вскрышных работ автоскреперами снимается чернозем с укладкой его в бурты вдоль соответствующих бортов карьеров с последующим нанесением на рекультивируемую площадь. Передовые вскрышные уступы отрабатывается комплексом в составе роторного экскаватора, системы ленточных конвейеров, перегружателя и отвалообразователя с укладкой породы во внутренний отвал. Укладка вскрышных пород в отвал выполняется двумя ярусами относительно горизонта установки отвального конвейера и отвалообразователя. Ниже расположены два вскрышных уступа, которые отрабатываются по транспортной системе экскаваторами с выгрузкой в автотранспорт и вывозом породы во внутренний отвал. Добывающий горизонт отрабатывается экскаваторами с выгрузкой в автотранспорт и транспортировкой руды передвижными пульпонасосными станциями. Дальше, путем гидромониторного размыва, пульпа по пульповодам грунтовыми насосами подается на обогатительную фабрику.

Иршинский ГОК осуществляет разработку ильменитсодержащих россыпных месторождений Иршинской группы. В настоящее время в процессе разработки

находятся Иршинское, Верхне-Иршинское, Лемненское и Междуреченское месторождения.

Принимая во внимание конкретные горно-геологические условия, при отработке карьеров принята: на вскрышных работах – бестранспортная система разработки с перегрузкой вскрышных пород в отработанное пространство, на добывающих работах – экскаваторно-гидравлический способ разработки с гидротранспортом рудных песков на обогатительную фабрику первичного обогащения.

На вскрышных работах используются драглаины ЭШ-10/60, ЭШ-10/70, ЭШ-11/70 и ЭШ-15/90. Средняя ширина заходки около 100 м. Данная ширина является минимальной по условиям ведения работ экскаватором-драглайном ЭШ-10/70 и при этом обеспечивает наименьшие объемы перегрузки вскрышных пород при их укладке в выработанное пространство или на рабочий борт карьера.

На добывающих работах в качестве добывающего оборудования применяются экскаваторы ЭШ-5/45, ЭШ-6,5/45, ЭШ-10/70, ЭШ-11/70, ЭШ-15/90, гидромониторы ГМД-250 с дистанционным управлением и землесосные установки ГРТ-1600/50.

Разработку в карьерах ведут двумя уступами – верхний вскрышной, нижний добывающий. Высота уступов устанавливается исходя из мощности вскрышных пород и рудных песков.

Экскаваторы, задействованные на добыче, складировывают рудные пески непосредственно из забоя на кровлю рудного слоя. Два гидромонитора с насадками выполняют размыв конуса рудных песков. Далее руду через приемный зумпф системой гидротранспорта подают на обогатительную фабрику первичного обогащения.

Опыт использования этой специальной схемы с применением гидромеханизации на карьерах Иршинского ГОКа показал, что данная система наиболее целесообразна в условиях большой обводненности месторождения и неустойчивости геологических параметров россыпи, когда колебания толщины вскрышных пород и рудных «песков» имеют место на сравнительно небольших площадях.

Эта система имеет ряд преимуществ перед системами, ранее применяемыми на Иршинском комбинате:

- обеспечивает при отработке месторождения достаточно полную выемку полезного ископаемого из недр (потери – 6,2...7,0 %);
- независимо от естественных условий позволяет организовать вскрышные, добывающие работы и транспортировку с наибольшей эффективностью;
- обеспечивает дополнительную дезинтеграцию «песков» во время размыва гидромониторами и при движении пульпы по трубопроводу на обогатительную фабрику;
- упрощает процесс горнотехнической рекультивации нарушенных горными работами земель за счет складирования вскрышных пород в отработанное пространство карьера, что позволяет сократить объемы работ по рекультивации.

Однако данная система имеет и ряд недостатков:

- большую энергоемкость технологической схемы за счет применения горнотранспортных машин с электродвигателями большой мощности, особенно при больших расстояниях транспортировки рудных «песков» на обогатительную фабрику;

– сложную и громоздкую схему оборотного водоснабжения и хвостового хозяйства, требующую большие площади под хвостохранилища и объемы воды для их осветления.

Однако при применении этой системы разработки преобладают положительные факторы, в связи с чем она широко применяется на карьерах Иршинского ГОК.

В странах дальнего зарубежья добычу руд коренных месторождений производят подземным и открытым способами. Открытый предусматривает применение буровзрывных работ для предварительного взрыхления горной массы (пустых пород и полезного ископаемого) и внешнее отвалообразование. Особенностью разработки подобных месторождений является то, что глубина карьеров не превышает 250...300 м. Это связано с высокой стоимостью земли, которая отводится во время эксплуатации под карьер и внешние отвалы пустых пород, хвостохранилища, а по окончании срока службы карьера – со значительными расходами на рекультивацию.

Поэтому добыче подобных руд подземным способом в странах дальнего зарубежья отдают предпочтение. При этом для сохранения дневной поверхности применяют системы разработки с закладкой выработанного пространства.

В последние годы в Украине институтом «Кривбаспроект» при выполнении «Технико-экономического обоснования кондиций для подсчета запасов апатит-ильменитовых руд Носачевского месторождения» была применена камерная система разработки с закладкой выработанного пространства. Кроме сохранения дневной поверхности удалось решить и задачу по размещению части хвостов в выработанном пространстве и, тем самым, сократить отвод земель под строительство хвостохранилища.

Все титаносодержащие руды для дальнейшей их переработки на губчатый титан или пигментный диоксид титана необходимо подвергать обогащению. На действующих фабриках ближнего и дальнего зарубежья обогащение титаносодержащих руд производится по схемам, включающим методы магнитной, гравитационной и флотационной сепарации. Методы обогащения определяются вкраплением рудных и нерудных минералов.

Грубозернистые ильменитсодержащие руды обогащаются гравитационными и магнитными методами с применением винтовых и магнитных сепараторов со слабым и сильным полями. Доводку концентратов до товарного качества осуществляют путем комбинации магнитных и электрических методов обогащения. Перед электрической сепарацией продукты сушат. В некоторых случаях для очистки поверхности частиц черновой концентрат обрабатывают кислотами или щелочами.

Магнитную сепарацию проводят в несколько стадий с разной напряженностью магнитного поля: на сепараторах со слабым полем – для выделения сильномагнитной фракции, обычно обогащенной ванадием, на сепараторах с сильным полем – для выделения слабомагнитной и немагнитной фракций. Промпродукты магнитной сепарации переочищаются гравитационными методами. Недостатком магнитно-гравитационных схем обогащения руд являются потери ильменита с тонкими классами, поскольку извлечение тонкодисперсного минерала в этих схемах затруднено.

При тонком вкраплении рудных минералов из технологической схемы исключается гравитационное обогащение и применяется флотация. Примером магнитно-флотационной схемы может служить освоение руд Кусинского

месторождения (Южный Урал). При обогащении данных руд магнитной сепарацией в несколько стадий получали (в данное время фабрика не работает) магнетитовый концентрат, а при обогащении флотацией, которая предусматривает основную перемешку и две перемешки черного концентрата с использованием анионных карбоксильных собирателей, а также сульфата и фторида натрия, как депрессоров, – ильменитовый концентрат с массовой долей диоксида титана 44...45 %, при извлечении 65...70 % от исходной руды.

В странах дальнего зарубежья по магнитно-флотационной схеме обогащаются титаномагнетитовые руды на фабрике «Отамяки» (Финляндия). После второй стадии дробления осуществляют сухую магнитную сепарацию для сброса хвостов. Продукт сепарации измельчается до крупности 90 % класса -0,2 мм и подвергается мокрой магнитной сепарации для выделения железо-ванадиевого концентрата. Хвосты магнитной сепарации следуют на флотацию пирита. Хвосты пиритной флотации отправляют на флотацию ильменита, которую осуществляют при pH 6,5. При массовой доле  $TiO_2$  15,5 % в исходной руде получают ильменитовый концентрат с массовой долей  $TiO_2$  44,8 % при извлечении 54,6 %.

По магнитно-гравитационно-флотационной схеме работают фабрики «Титания» (Норвегия) и «Мак-Интайр» (США). Обогащительная фабрика «Титания» производительностью 2,8 млн. т в год, работает на рудах месторождений Сторгауген и Телнес. Схема подготовки руды к обогащению предусматривает три стадии дробления, одну стадию измельчения до крупности -0,2 мм и мокрую магнитную сепарацию с получением магнетитового концентрата. На фабрике работают цехи гравитационного и флотационного обогащения руды. Производят концентрат с содержанием диоксида титана 44 %. Извлечение диоксида титана составляет 60 % от исходной руды. В цехах флотации с применением в качестве собирателя смеси из талового и топливных масел и эмульгатора (расходы 0,9...1,2 кг/т), депрессора – фторида натрия (расходы 0,2 кг/т) получают черновой ильменитовый концентрат, который далее следует на выщелачивание для удаления из него фосфора (время выщелачивания составляет 2 часа). В итоге флотационного обогащения руды получают ильменитовый концентрат с массовой долей  $TiO_2$  44,6 % при извлечении 68,0 % (массовая доля  $P_2O_5$  – 0,02 %).

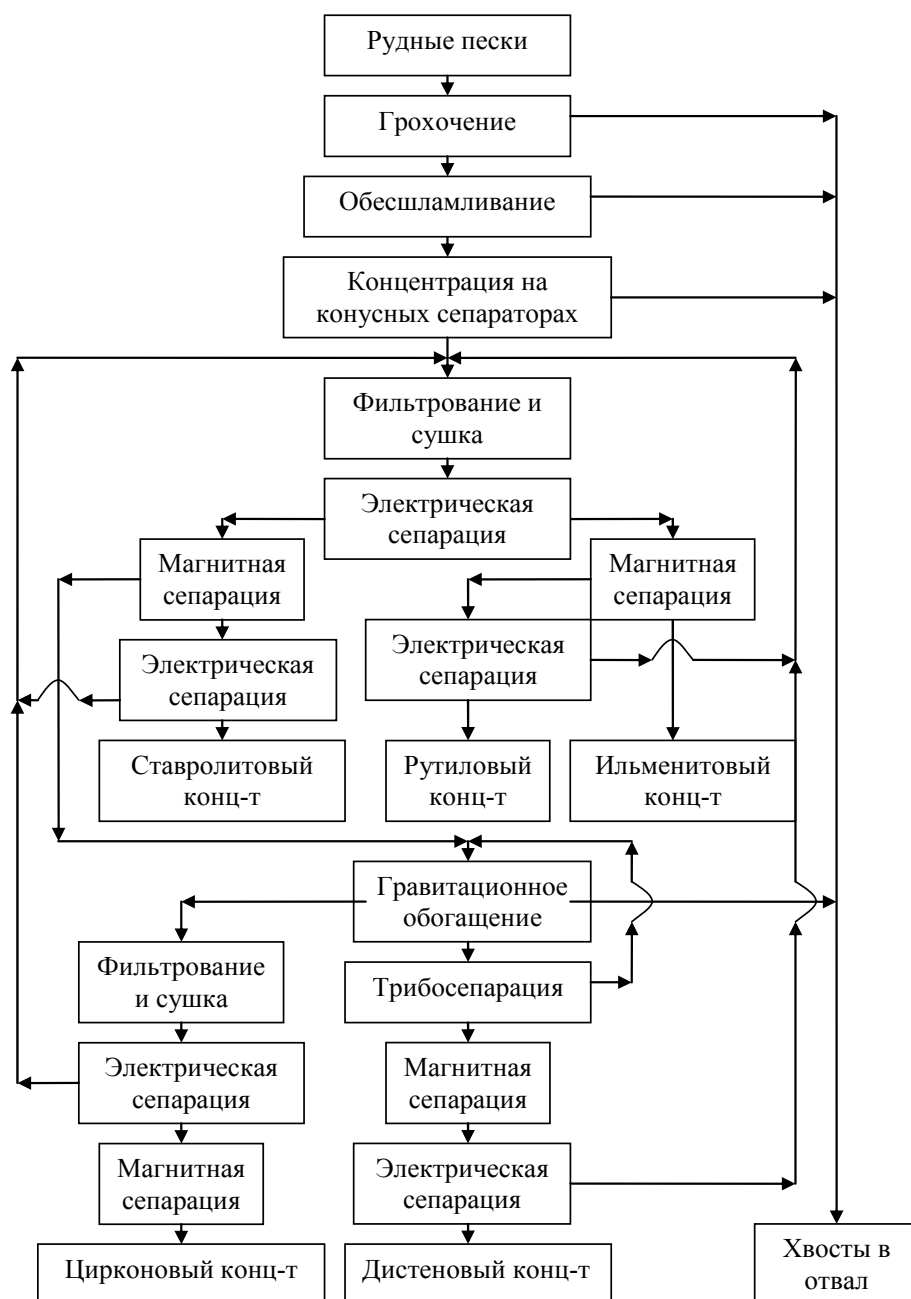
Применение флотации в схемах позволяет значительно снизить потери тонковкрапленного ильменита. Общим для промышленной флотации ильменита является:

- флотация в кислотной или слабокислотной средах;
- применение фтористых соединений для депрессии апатита и других нерудных минералов и активации ильменита;
- контактирование суспензии при высокой массовой доле твердого (50...70 %);
- применение в качестве собирательной смеси жирнокислотных реагентов и нейтральных углеводов;
- необходимость обесшламливания суспензии перед контактированием с целью снижения расходов реагентов на флотацию.

Недостатком разработанных схем является сложность ведения процесса флотации в холодное время года, экологические проблемы, связанные с использованием фтористых соединений.

В Украине на Иршинском ГОК и Вольногорском ГГМК ильменитовый концентрат получают по схемам с использованием гравитационного, электрического и магнитного методов обогащения.





**Рисунок 2** – Принципиальная схема обогащения титан-циркониевых песков ВГГМК

Производство на обогатительных фабриках Вольногорского ГГМК включает три передела: рудоподготовку, первичное обогащение, дообогащение первичного концентрата и получение товарных концентратов. Отделение рудоподготовки включает грохочение исходных песков с выводом в отвал надрешетного продукта контрольного грохота (класс +6 мм); обесшламливание в гидроциклонах диаметром 1,0 и 0,75 м и струйных зумпфах диаметром 15, 18 и 10 м, сгущение и складирование отмытых песков в зумпфах.

Отделение первичного обогащения отмытых песков предусматривает основную, промпродуктовую и контрольную концентрации на конусных сепараторах с получением коллективного концентрата и отвальных хвостов.

Отделение дообогащения включает электрическую сепарацию высушенного коллективного концентрата, отдельную обработку проводниковой и непроводниковой

фракций с использованием магнитной сепарации, гравитационного обогащения, а также электрическую и магнитную сепарацию черновых концентратов. На рис. 2 представлена принципиальная схема обогащения титан-циркониевых песков Вольногорского ГГМК, в табл. 2 – проектные технологические показатели переработки рудных песков.

Стратегия развития предприятия предусматривает инвестирование средств на отработку действующего комплексного участка Малышевского месторождения (Восточная), а также для расширения в перспективе сырьевой базы комбината путем освоения Мотроно-Анновского участка.

**Таблица 2 – Проектные технологические показатели переработки рудных песков ВГГМК**

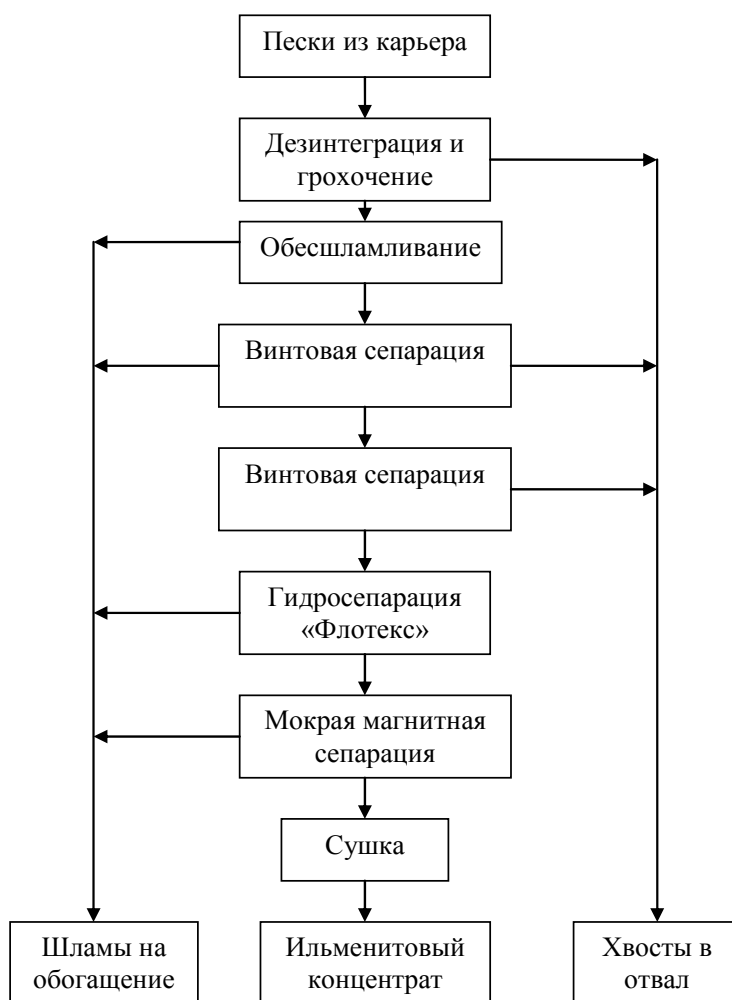
| Наименование показателей           | Единица измерения | Значение  |      |
|------------------------------------|-------------------|-----------|------|
|                                    |                   | проект    | факт |
| Содержание в песках                | кг/м <sup>3</sup> |           |      |
| - ильменита                        |                   | 38,0      |      |
| - рутила                           |                   | 14,4      |      |
| - циркона                          |                   | 9,4       |      |
| - дистена + силиманита             |                   | 10,0      |      |
| - ставролита                       |                   | 10,0      |      |
| Извлечение в товарные концентраты: | %                 |           |      |
| - ильменита                        |                   | 85,0/86,0 |      |
| - рутила                           |                   | 90,0/88,7 |      |
| - циркона                          |                   | 91,0/89,5 |      |
| - дистена+силиманита               |                   | 46,0      |      |
| - ставролита                       |                   | 50,0      |      |
| Содержание в товарных концентратах | %                 |           |      |
| - ильменита                        |                   | 93,0      |      |
| - рутила                           |                   | 98,0      |      |
| - циркона                          |                   | 96,0      |      |
| - дистена + силиманита             |                   | 91,0      |      |
| - ставролита                       |                   | 90,0      |      |

На Иршинском ГОКе первичное обогащение выполняется на обогатительных фабриках карьеров №№ 5, 6, 7, 8 и 9. Доводка ильменитовых концентратов осуществляется с применением гравитационных и магнитных методов и разделяется на четыре основных обогатительных передела:

1. Подготовка песков к обогащению – осуществляется с целью размыва (дезинтеграции) песков, поданных на фабрику, удаления крупных (больше 4,0 мм) и мелких (меньше 0,05 мм) классов, которые практически не содержат ильменит. В состав этих классов входит крупный кварц, галька, полевой шпат, каолин, глина и тому подобное. Подготовку песков проводят в мокром режиме (в виде пульпы) с помощью нескольких стадий операций дезинтеграции, грохочения и обесшламливания. Основным оборудованием этих операций служат скрубберы, инерционные грохоты и гидроциклоны. Продуктом подготовки песков является так называемая «зернистая масса», которая содержит 8...15 % ильменита.

2. Гравитационное обогащение – осуществляется с целью удаления основной массы пустой породы, то есть кварца, зерна которого почти в два раза легче зерен

ильменита. Этот этап обогащения проводится с помощью нескольких стадий винтовой сепарации. Основным оборудованием являются винтовые сепараторы разных моделей. Продуктом гравитационного обогащения служит черновой ильменитовый концентрат, который содержит до 70 % ильменита.



**Рисунок 3** – Принципиальная схема обогащения ильменитовых песков ИрГОКа

3. Мокрая магнитная сепарация – поскольку ильменит в отличие от кварца имеет магнитные свойства, то в процессе мокрой магнитной сепарации осуществляется доочистка большей части чернового ильменитового концентрата до массовой доли ильменита больше 94,5 % (готовая продукция). Сепарацию проводят на валковых электромагнитных сепараторах типа ЭВС.

4. Сухая магнитная сепарация – поскольку магнитная сепарация в мокром режиме недостаточно эффективна и не позволяет достичь максимального извлечения ильменита в конечный продукт, то для доизвлечения ильменита из отходов мокрой магнитной сепарации применяется сухая магнитная сепарация, которая проводится на валковых электромагнитных сепараторах типа 2ЭВС-36/100. Конечным продуктом является ильменитовый концентрат с массовой долей ильменита не менее 94,5 %.

Кроме вышеперечисленных основных операций, в технологической схеме обогащения применяются вспомогательные операции: обезвоживание и сушка. Они осуществляются с помощью обезвоживающих конусов, вакуум-фильтров и барабанных печей.

Принципиальная схема и показатели обогащения ильменитовых песков Иршинского ГОКа представлены ниже (рис. 3 и табл. 3).

**Таблица 3** – Фактическое извлечение из рудных песков полезных компонентов на Иршинском ГОКе

| Показатель           | Ед. изм. | 2007 г. | 2008 г. | 2009 г. |
|----------------------|----------|---------|---------|---------|
| Извлечение ильменита | %        | 78,35   | 78,13   | 77,77   |

Для повышения эффективности процесса обогащения на Иршинском ГОКе планируется выполнение следующих мероприятий: приобретение и установка на фабрике Лемненского рудника дополнительного магнитного сепаратора 4ЭРМ; реконструкция доводочной фабрики № 1 с установкой двух магнитных сепараторов 4ЭРМ; поэтапная замена винтовых сепараторов на фабриках первичного обогащения.

Следует отметить, что основные предприятия по добыче и переработке титановой руды были построены в Украине еще в шестидесятые годы прошлого века и действуют сегодня без коренных изменений техники и технологии. В настоящее время требуется реконструкция предприятий с заменой устаревшего оборудования, что требует дополнительных инвестиций. Но специфика экономики титанового производства такова, что расходы на добычу и обогащение имеют незначительный вес – около 4,0 % от общих расходов на производство губчатого титана и около 12 % на производство пигментного диоксида титана сульфатным способом. Поэтому основные расходы и прибыль формируются на химических и металлургических предприятиях в связи с чем максимальный эффект от реконструкции и замены устаревшего оборудования и принципиальных схем может быть получено на этих предприятиях [3].

Совершенствование технологий добычи возможно за счет применения нового оборудования мирового уровня. Например, в «Технико-экономическом обосновании постоянных кондиций для подсчета запасов рудных песков Мотроновско-Анновского участка Малышевского месторождения» на открытых горных работах ГПИ «Кривбаспроект» предусмотрено применение роторных комплексов типа SRs-2000 фирмы «MAN TAKRAF» для выемки вскрышных пород, что позволит комбинату поднять производительность труда на вскрышных работах и уменьшить потребление электроэнергии.

С экологической точки зрения (при условиях сохранения дневной поверхности, уменьшения площадей, которые будут использованы под карьер, хвостохранилище и все такое) преимущество следует отдавать подземному способу разработки с закладкой выработанного пространства хвостами обогащения.

В мировой практике сложились стандартные схемы: мокрая концентрация тяжелых минералов на гравитационных аппаратах (винтовых, конических сепараторах, концентрационных столах и тому подобное); черновой концентрат гравитации обычно обогащается мокрой или сухой магнитной сепарацией на электромагнитных валковых, роликовых или роторных сепараторах; концентрат магнитной сепарации далее подвергается электросепарации на коронных электростатических сепараторах.

В целом мировое производство диоксида титана в 2008 г., по данным Геологической службы США, оценивается в 5280 тыс. т, а его географическая структура, по оценке, характеризовалась следующими данными (тыс. т) [4]: США – 1580; КНР – 980; Германия – 440; Япония – 317; Великобритания – 290; Австралия – 241; Финляндия – 130; Франция – 125; Мексика – 125; Украина – 120; Канада –

90; Италия – 80; Испания – 80; Бельгия – 74; Россия – 20; Казахстан – 1; другие страны – 670.

Производителями конечных продуктов  $TiO_2$  выступают крупнейшие корпорации мира: «DuPont», «Hunstmann», «Kemira», «Tronox», «Kronos», «Cristal», «Ishi-hara». В число первых пятнадцати компаний-производителей пигментного диоксида титана входят и украинские предприятия ЗАО «Крымский титан» и ОАО «Сумыхимпром». Приблизительно 80 % мирового потребления диоксида титана приходится на производство лакокрасочных материалов и полимеров. Ведущими его потребителями являются США (свыше 3 кг на душу населения), страны ЕС и Японии (2 кг) [5].

Проблема повышения качества ильменитового концентрата включает два аспекта – химический и минеральный состав продукта. Для химической переработки ильменитового концентрата важным является стабильное содержание в ильмените основных химических компонентов ( $TiO_2$ ,  $FeO$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $P_2O_5$ ,  $Cr_2O_3$ ). В концентрате ИрГОКа колебания массовой доли указанных компонентов (за исключением  $Cr_2O_3$ ) значительные, это обусловлено геологическими особенностями месторождений, которые обрабатываются. Весь ильменит условно можно разделить на две категории по степени измененности (выщелачиванию железа): неизменный ( $TiO_2$  до 56...57 %,  $FeO / Fe_2O_3$  больше 1,0) и измененный ( $TiO_2$  больше 56...57 %,  $FeO / Fe_2O_3$  менее 1,0). Для эффективной химической переработки ильменитового концентрата сернокислым способом нужен неизменный ильменит, другими словами, в ильменитовом концентрате содержание зерен измененного ильменита должно быть минимальным.

Разделение ильменитового концентрата на неизменный и измененный достигается магнитным фракционированием, то есть разделением зерен ильменита по степени магнитной восприимчивости (измененный ильменит характеризуется меньшими магнитными свойствами). Альтернативным вариантом магнитному фракционированию является процесс барьерной магнитной сепарации, в котором сведено к минимуму влияние механических факторов на процесс разделения (магнитная флокуляция, центробежные силы, распределение зерен в потоке и т.п.). Напротив, при работе валковых сепараторов (типа ЭВМ, ЭВС) данные факторы значительно влияют на процесс магнитного фракционирования. Альтернативным вариантом процессу барьерной магнитной сепарации является обогащение на роторных сепараторах 6 ЕРМ-100 НТЦ «МАГНИС» (Украина).

Для повышения качества концентрата по минеральному составу необходимо решить проблему снижения содержания кварца, сидерита, марказита и его сростков в концентрате, что также возможно методами, описанными выше.

Современная металлургия – один из основных потребителей титана. Титан вводят: в нержавеющие стали для предотвращения межкристаллической коррозии; в жаростойкие высокохромовые сплавы – для уменьшения размера зерна; в другие сплавы – как укрепляющий элемент. При этом следует отметить, что на металлический титан сегодня перерабатывается лишь около 5 % титанового сырья, которое добывается в мире, остальные 95 % используются для получения пигментного диоксида титана.

Основной отраслью применения металлического титана и его сплавов является авиационно-космическая промышленность. Другими отраслями применения титана и его сплавов являются морское судостроение, химическая промышленность,

автомобилестроение, атомная и тепловая энергетика, нефтегазодобывающая промышленность, строительство, медицина, товары широкого потребления.

Производство металлического титана основано на восстановлении тетрахлорида титана магнием, реже – натрием. При этом получают реакционную массу – промежуточный продукт, загрязненный магнием (натрием), который не вступает в реакцию. После очистки от этих и других примесей и отбракования низкокачественной части блока губчатого титана губка удовлетворительного качества переплавляется в компактный металл. Сырьем для производства титановой губки служат ильменитовые концентраты, для которых ограничено содержание ильменита (не менее 94,5 %);  $TiO_2$  (не менее 63 %);  $Al_2O_3$  (не больше 3 %);  $SiO_2$  (не больше 2 %);  $P_2O_5$  (не больше 0,25 %);  $Cr_2O_3$  (не больше 0,1 %). Наиболее важной примесью, которая должна быть четко ограничена в концентрате, является диоксид кремния. Кроме этого, ильменитовые концентраты ограничены по содержанию влаги (не более 0,5 %); максимальному размеру зерна в концентрате (3 мм) и фракции 0,04 мм - не более 0,4 %. Содержание мелких фракций в концентрате приводит к увеличению норм затраты материалов и электроэнергии при его переработке.

При производстве пигментного диоксида титана, который используют для изготовления красок и косметики, к ильменитовому концентрату выдвигаются требования по степени изменяемости концентрата по фазовому составу. При длительном выветривании руды за счет перехода двухвалентного железа в трехвалентное и его вынесения происходит обогащение ильменита титаном (так называемая лейкоксенизация); содержание  $TiO_2$  в таких ильменитах достигает 60...65 % и больше. Следует отметить, что ильменитовые концентраты с высоким содержанием  $TiO_2$  не пригодны для сульфатного способа производства диоксида титана. Они могут быть использованы для производства титан-фосфорных шлаков при низком содержании в них хромовых примесей.

**Таблица 4 – Требования потребителей к качеству ильменитовых концентратов**

| Год  | Потребитель          | Содержание, % |               |               |               |               |
|------|----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|      |                      | $TiO_2$       | $P_2O_5$      | $Cr_2O_3$     | $FeO/Fe_2O_3$ | ильменит      |
| 2007 | ЗАО «Крымский титан» | 55,15...55,53 | 0,110...0,129 | 0,028...0,030 | 1,07...1,27   | 96,34...96,48 |
|      | ОАО «Сумыхимпром»    | 55,62...59,49 | 0,129...0,175 | 0,028...0,035 | 0,65...1,05   | 96,20...96,61 |
|      | Чехия                | 56,07...56,78 | 0,126...0,135 | 0,028...0,030 | 0,96...1,04   | 96,25...96,41 |
| 2008 | ЗАО «Крымский титан» | 55,81...56,56 | 0,112...0,138 | 0,028...0,029 | 1,05...1,19   | 96,77...97,05 |
|      | ОАО «Сумыхимпром»    | 54,08...59,14 | 0,11...0,171  | 0,027...0,033 | 0,79...1,43   | 96,30...96,52 |
|      | Чехия                | 56,11...57,12 | 0,134...0,145 | 0,028...0,030 | 0,92...1,16   | 95,80...96,54 |
| 2009 | ЗАО «Крымский титан» | 54,74...56,12 | 0,106...0,147 | 0,027...0,029 | 1,14...1,63   | 96,52...97,98 |
|      | ОАО «Сумыхимпром»    | 55,24...58,46 | 0,105...0,185 | 0,025...0,032 | 0,80...1,54   | 95,94...97,65 |
|      | Чехия                | 58,36...59,22 | 0,189...0,203 | 0,030...0,033 | 0,74...0,81   | 95,11...96,34 |

Кроме измененного фазового состава ильменита, важным показателем концентратов является наличие в нем примесей разных руд ( $SiO_2$  в виде песка, пироксена и других руд) и оксидов ( $Al_2O_3$ ,  $FeO$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $SiO_2$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $P_2O_5$ ,  $V_2O_5$ ,  $MnO$ ,  $MgO$ ). Для пигментной промышленности особенное значение имеют те примеси, которые негативно влияют на пигментные свойства и, особенно, на белизну готового продукта:  $FeO$ ,  $Fe_2O_3$  (дают красный оттенок),  $CrO$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $CrO_2$ ,

$CrO_3$  (коричнево-желтая расцветка),  $MnO$  (серый цвет),  $V_2O_5$  (красный цвет). Наличие примесей-окси-дов, которые негативно влияют на качество конечного продукта – пигментного диоксида титана – должно находиться в пределах требований.

Требования потребителей к качеству ильменитового концентрата и технические показатели которого регламентируются ТУ В 14-10-009-97 представлены в табл. 4 и 5.

**Таблица 5 – ТУ В 14-10-009-97 «Концентрат ильменитовый»**

| Наименование показателей                  | Значения |
|-------------------------------------------|----------|
| Массовая доля ильменита, %                | 94,5     |
| Массовая доля диоксида титана:            |          |
| - не меньше, %                            | 52,0     |
| - не больше, %                            | 65,0     |
| Массовая доля примесей, не больше, %      |          |
| $P_2O_5$                                  | 0,25     |
| $Cr_2O_3$                                 | 0,10     |
| Массовая доля влаги, не больше, %         | 1,5      |
| Максимальный размер зерен концентрата, мм | 3,0      |

**Выводы.** Анализ запасов титансодержащих месторождений показал, что 85 % мировых запасов титана сосредоточенно в коренных месторождениях, в основном магматических, представленных ильменитовыми, ильменит-гематитовыми, ильменит-магнетитовыми, ильменит-титаномagnetитовыми и титаномagnetитовыми рудами. Украина входит в десятку ведущих стран мира по добыче и производству ильменитовых концентратов и получаемых из них титановых продуктов.

Внедрение современных технологий разработки коренных месторождений является одним из направлений развития титанового производства и повышения его конкурентоспособности. Кроме титана, из комплексных руд Украины попутно необходимо излекать такие дефицитные продукты, как апатит и ванадий, что позволит создать собственную базу этих видов сырья. Комплексное использование титановых руд необходимо развивать по двум направлениям:

- максимальное извлечение самих титансодержащих минералов в одноименные концентраты;
- выделение полезных минералов в концентраты, пригодные для последующего их использования в производстве удобрений и ванадийсодержащих продуктов.

Комплексное использование титановых руд позволит создать малоотходные технологии с полным использованием всех компонентов руды и замкнутым водооборотом.

Анализ практики обогащения титановых руд показал, что ильменитовый концентрат получают по схемам с использованием гравитационного, электрического и магнитного методов обогащения.

Разделение ильменитового концентрата на неизменный и измененный достигается магнитным фракционированием, то есть разделением зерен ильменита по степени магнитной восприимчивости. Альтернативным вариантом магнитному фракционированию является процесс барьерной магнитной сепарации, в котором сведено к минимуму влияние механических факторов на процесс разделения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бюллетень иностранной коммерческой информации // ВНИКИ. – 2009. – № 4. – С.16.
2. *Быховский Л. З.* Освоение сырьевой базы титана – актуальная задача горной промышленности / Л. З. Быховский, Л. П. Тигунов, Л. Б. Зубков // Минеральные ресурсы России. – 2001. – № 4. – С. 17-22.
3. *Губин Г. В.* Современное состояние мирового и внутреннего рынка титана / Г. В. Губин, Т. А. Олейник, Ф. Г. Татаринов // Разработка рудных месторождений: труды КГТУ. – 2006. – Вып. 90. – С. 100-105.
4. Состояние и перспективы мирового рынка титановых минералов и пигментов // БИКИ. – 2008. – № 5. – С. 12-15.
5. Состояние японского рынка диоксида титана и металлического титана // БИКИ. – 2008. – № 2-3. – С. 23.

Стаття надійшла до редакції 07.05.2010 р.

Рецензент, проф. М.Ю. Пазюк