

На правах рукописи



Масалимов Алексей Валерьевич

Разработка технологии получения высокочистой магнезии из  
отсевов тяжелосреднего обогащения магнезита

25.00.13 – Обогащение полезных ископаемых

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Магнитогорск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент Гришин Игорь Анатольевич

Официальные оппоненты:

Газалеева Галина Ивановна, доктор технических наук, Заведующий отделом рудоподготовки и специальных методов исследований ОАО «Уралмеханобр», г. Екатеринбург

Орлов Станислав Львович, кандидат технических наук, главный специалист ООО «Первый горно-металлургический институт», г. Екатеринбург

Ведущая организация:


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург

Защита состоится «22» апреля 2022 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.111.02 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова») по адресу: 455000, Челябинская область г. Магнитогорск, пр. Ленина 38, малый актовый зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и на сайте <https://www.magtu.ru>

Автореферат разослан «    » февраля 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук



С.Н. Корнилов

**Актуальность темы исследования** Повышение качества продукции в настоящее время является неотъемлемой частью действующего и развивающегося производства, поскольку позволяет предприятию оставаться конкурентоспособным и решать возникающие трудности. Но с развитием технологий остро встает проблема истощения потенциала природных ресурсов, следствием которой является снижение качества доступного сырья.

На сегодняшний день наблюдается истощение доступной минерально-сырьевой базы магнезита. Разведанные запасы России составляют 806 млн.т. по категориям А+В+С<sub>1</sub> и 178 млн.т. по категории С<sub>2</sub>. Кроме того, имеются прогнозируемые ресурсы: по категории Р<sub>1</sub> = 71.4 млн.т.; по категории Р<sub>2</sub> = 62 млн.т. и по категории Р<sub>3</sub> = 2441.9 млн.т. Всего разведано 12 месторождений магнезита, из которых 3 находятся в разработке. Освоение месторождений затруднено ввиду их удаленности и отсутствия необходимой инфраструктуры. За период 1993-2004 гг. запасы сократились на 3 млн. тонн. В 2012 году объем запасов магнезита сократился на 400 тыс.т., а в 2019 году на 673 тыс.т.

В 2004 году в России было добыто 2667 тыс. т. магнезита, 98% из которых добыто в Челябинской области и 1,3% в Красноярском крае. В 2016 году добыто 1555 тыс.т. магнезита, 75% которых добыто в Челябинской области. При этом в 2012 году, по данным Федеральной таможенной службы, в Россию было импортировано 60 тыс.т. магнезита. В 2019 году импорт магнезита составил уже 95 тыс.т. Доля импорта от общего объема потребления магнезита достигает на сегодняшний день 30%.

Это приводит к необходимости вовлекать в переработку техногенные виды сырья и совершенствовать технологии его переработки. В условиях сокращения запасов доступных руд отсева, полученные при добыче и тяжелосредном обогащении магнезита с достаточно высоким содержанием MgO, можно рассматривать как потенциальное сырьё. Очевидно, что ключевым фактором, определяющим развитие технологий переработки, является наличие доступного источника сырья. Именно такая ситуация сложилась сегодня в г. Сатке, на площадке группы компаний «Магнезит», где имеется 250 тыс.т. отсева тяжелосредного обогащения и их количество продолжает увеличиваться.

Учитывая острую потребность в качественном и доступном сырье, представляется актуальным решить задачу поиска новых материалов и технологий для их обогащения с целью получения

высокоочищенной магнезии (не менее 99% оксида магния). Одним из потенциальных видов сырья для процессов обогащения могут являться складированные отсеvy магнетита, ранее считавшиеся непригодными для дальнейшего обогащения.

В настоящей диссертационной работе выполнен комплекс исследований отсеvов тяжелосреднего обогащения магнетита, рассматриваемых как техногенное сырьё, позволивший определить их химический, минералогический состав и кристаллическую структуру, а также разработана и экспериментально проверена модель процесса бикарбонатного выщелачивания, предложена технология получения высокоочищенной магнезии с активной поверхностью из отсеvов тяжелосреднего обогащения магнетита.

**Цели и задачи.** Главной целью данной работы является исследование состава и свойств отсеvов магнетита, как техногенного сырья, а также разработка технологии их обогащения с получением магнезии высокой степени чистоты, с массовой долей MgO не менее 99%.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи: исследование химического и минерального состава отсеvов магнетита; изучение особенностей процесса бикарбонатного выщелачивания данного сырья; обоснование возможности получения оксида магния с массовой долей MgO не ниже 99% и высокой удельной поверхностью из отсеvов тяжелосреднего обогащения магнетита.

**Объекты исследования:**

– отсеvy тяжелосреднего обогащения магнетита Саткинского месторождения фракции 0-8мм;

**Предметы исследования:**

- химический, минеральный и фазовый состав отсеvов тяжелосреднего обогащения магнетита;
- рациональные параметры бикарбонатного выщелачивания для обеспечения максимального извлечения оксида магния из отсеvов магнетита;
- процессы обогащения магнетитов химическими методами;
- условия физико-химического равновесия при бикарбонатном методе выщелачивания.

**Методы исследования**

При проведении исследования были использованы методы математического и экспериментального моделирования, микроскопический анализ, ситовый анализ, а также экспериментальные методы аналитической химии, включающие

гравиметрический, термический (с применением прибора STA (Jupiter 449 F3) фирмы «NETZSCH») и объемный анализ.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Отсевы производства магнезита фракции 0-8 мм представляют собой изоморфные твердые растворы карбонатов кальция и железа в магнезите, что делает примеси  $\text{CaCO}_3$  и  $\text{FeCO}_3$  трудноудаляемыми и обуславливает необходимость применения бикарбонатного выщелачивания для получения высокочистой магнезии, обладающей высокой активностью и удельной поверхностью.
2. Математическая модель, основанная на процессах термодинамического равновесия и методе Левенберга-Марквардта, для определения параметров процесса бикарбонатного выщелачивания позволяет определить рациональные температуру и парциальное давление углекислого газа для получения магнезии с содержанием  $\text{MgO}$  не менее 99% с высокой активностью и удельной поверхностью.
3. Предложена технология обогащения отсевов магнезита, которая позволяет получить продукт с содержанием  $\text{MgO}$  не менее 99% и содержит следующие операции: прокаливание измельченных до фракции 0,0-0,1мм отсевов при температуре 750 °С в течение 120 минут; выщелачивание прокалённого продукта в течение 120 минут при температуре 20 °С и парциальном давлении углекислого газа  $1,5 \cdot 10^5$  Па; осаждение из раствора карбоната магния и прокаливание полученного карбоната при 715 °С в течение 120 минут.

### **Научная новизна работы**

1. Установлено, что структура отсевов магнезита является изоморфной, что предопределяет использование химических методов обогащения.
2. Установлено, что влияние температуры на селективность извлечения магния из отсевов магнезита и на состав продуктивного раствора носит экспоненциальный характер. Влияние парциального давления углекислого газа на селективность извлечения магния из отсевов магнезита носит асимптотический характер.
3. Разработана и реализована математическая модель «Программа расчёта термодинамических равновесий углекислотного выщелачивания», позволяющая на основе термодинамических равновесий, используя метод Левенберга-Марквардта, прогнозировать химический состав продуктивного раствора выщелачивания и определять рациональные параметры процесса бикарбонатного выщелачивания.

4. На основе установленных зависимостей и разработанной математической модели определена возможность получения высококачественной магнезии с высокой удельной поверхностью из отсевов магнезита.

#### **Практическая значимость работы**

Практическая значимость работы состоит в разработке технологии переработки ранее не обогащавшихся отсевов магнезита, которая позволяет получать высококачественную магнезию, повышает производительность и оптимизирует бикарбонатный метод выщелачивания за счет применения разработанной математической модели.

**Обоснованность и достоверность** результатов диссертационного исследования обеспечивается использованием современных методов моделирования, а также результатами экспериментальных исследований, подтверждающих результаты моделирования. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, подтверждаются значительным объемом фактических данных, наглядно представленных в приведенных таблицах и рисунках. Сбор, обработка, статистический анализ и интерпретация полученных результатов проведены с применением современных методов обработки информации и статистического анализа.

**Личный вклад автора** заключается в постановке цели и задачи исследования, проведении теоретического анализа, постановке и проведении серий экспериментов для подтверждения математической модели, анализе, систематизации и обобщении полученных результатов и подготовке публикаций

**Апробация работы.** Основные результаты и положения диссертационной работы доложены и обсуждены на 67-70 межрегиональных научно-технических конференциях (Магнитогорск, 2009-2012), 7th International Conference on Instrumental Methods of Analysis (Chania, Greece, 2011), 77 международной научно-технической конференции (Магнитогорск, 2019).

**Публикации.** По теме работы опубликовано 7 научных работ, в том числе 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ; 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FZRU-2020-0011).

**Структура и объем диссертации.** Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 127 наименований, содержит 102 страницы машинописного текста, 37 рисунков и 28 таблиц.

### **Общая характеристика работы**

В настоящее время в России наблюдается рост потребности в высокочистой магнезии с высокой активной поверхностью, потребляемой для производства трансформаторной стали, наполнителей резины, адгезивов, пластических масс, химических реагентов, огнеупоров на фоне ухудшения сырьевой базы магнезитов (дефицит магнезита составляет около 800 тыс. т. ежегодно) и отсутствии в России собственных производств высокочистой магнезии. При этом методы получения высокочистой магнезии с высокой активной поверхностью достаточно дороги и имеют невысокую производительность.

В связи с этим, важное значение имеет развитие методов обогащения для достижения оптимальной производительности и максимального извлечения оксида магния из сырья.

Ранние исследования показали возможность обогащения отсеков магнезита, однако ввиду особенностей их минеральной структуры получить продукт с требуемым содержанием оксида магния не удалось. Вопросами обогащения отсеков магнезита с получением оксида магния занимались Латте Ф.Е., Гапонов Я.Г., Загнойко В.В., Коптелов В.Н., Смирнов А.П., Лотов В.А., Архипов В.А., Ткач Г.А., Беляев Э.К., Попов А.Ф., Рябцев А.Д., Вахромеев А.Г., Менжерес Л.Т. и другие ученые. Однако, в ходе различных исследований получить продукт с содержанием оксида магния выше 93% не удалось.

**Во введении** дано обоснование актуальности темы исследования, сформулированы цель и задачи исследования, изложены научная новизна и практическое значение работы.

**В первой главе** представлен аналитический обзор опубликованных в российских и зарубежных изданиях работ в области обогащения магнезиального сырья, рассмотрены основные источники магнезиального сырья.

Отмечено, что на сегодняшний день, несмотря на значительные запасы магнезита в России (806 млн. т. по категориям А+В+С<sub>1</sub> и 178 млн. т. по категории С<sub>2</sub>), наблюдается снижение добычи и истощение разрабатываемых месторождений, при росте потребления. Разница между добычей и потреблением компенсируется за счет импорта. Отдельно выделена ситуация с высокочистым оксидом магния (более 99% MgO) с высокой удельной поверхностью, который не производится в России, а полностью импортируется.

Анализ ранее проведенных немногочисленных исследований, направленных на переработку отсевов тяжелосреднего обогащения магнезита, показал, что их переработка без применения химических методов позволяет получить оксид магния с содержанием основного компонента не выше 93%. Отдельно выделено, что получение оксида магния с высокой удельной поверхностью может быть реализовано только за счёт разложения кислородсодержащих соединений.

На основе анализа литературных данных сформулированы задачи исследований, требующие решения для достижения поставленной цели.

**Первое защищаемое положение доказано во 2 главе.** Исходные отсевы магнезита содержат 42-46% оксида магния до прокаливания и 85-90% после прокаливания. Среди примесей наблюдаются карбонаты кальция и железа, а также оксиды кремния и алюминия. Отсевы представлены классом крупности менее 8 мм и являются отходом тяжелосреднего обогащения магнезита.

Установлено присутствие в значительном количестве нежелательных примесей и относительно низкое содержание оксида магния в полностью прокаленном состоянии. Результаты химического анализа представлены в таблице 1.

Таблица 1– Химический состав отсевов магнезита фракции 0-8 мм Саткинского месторождения (%)

Образец	Массовая доля, %						
	MgO	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S	ППП
Непрокаленный	44,04	2,22	0,50	1,83	0,96	0,15	49,43
Прокаленный	89,1	4,5	1,01	3,7	1,95	0,31	-

В ходе микроскопического исследования было установлено, что порода, образующая отсевы магнезита, состоит из ромбоэдрических кристаллов магнезита, с простыми прямолинейными контурами, плотно прилегающих друг к другу. Размеры зерен от 0,08 до 0,18мм. Структура среднезернистая, мозаичная. Также в ней отсутствуют в виде отдельных зёрен доломит и кальцит. Таким образом, можно заключить, что вкрапленность минералов является эмульсионной, либо они не представлены в виде отдельных минералов и представляют собой



твердые растворы с магнезитом, образуя изоморфную структуру. Микрофотография породы, из которой состоят отсевы магнезита, представлена на рисунке 1.

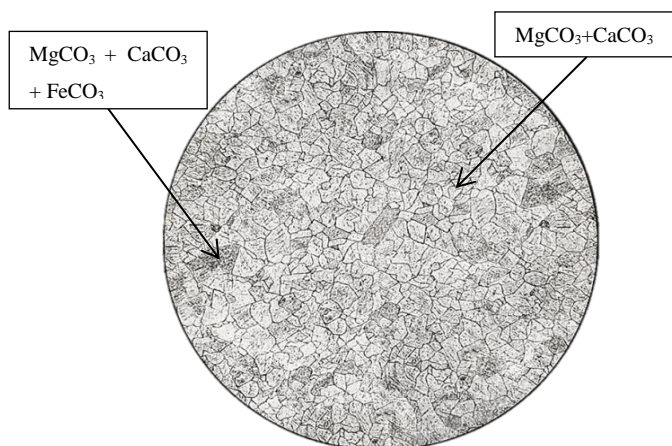


Рисунок 1. Микрофотография отсевов магнезита. Без анализатора. Увеличение – 46.

Термогравиметрический анализ проводился на синхронном термоаналитическом приборе STA (Jupiter 449 F3) фирмы «NETZSCH». Все термограммы были получены в условиях непрерывного нагревания проб отсевов магнезита до температуры 900°C со скоростью 20° /мин в атмосфере инертного газа (аргон). На рисунке 2 представлены термограммы отсевов магнезита фракции 0-8 мм Саткинского месторождения.

Опираясь на результаты термогравиметрического анализа, можно утверждать, что диссоциация всех минералов в образце полностью завершается при температуре 800°C, при этом достигается уменьшение массы на 50%, которая при дальнейшем нагревании не изменяется. Определены три основных пика разложения при следующих температурах: 504,9°C, 671,3°C и 773,7°C. Установлено, что разложение образца начинается при температуре около 476°C и достигает максимума при 671,3°C. Разложение основного минерала – карбоната магния – завершается к 711,2°C, при этом убыль массы образца составляет 38%. При дальнейшем подъеме температуры продолжают процессы диссоциации доломитов, представляющих собой непрерывный ряд твердых растворов состава  $x[\text{MgCO}_3] \cdot y[\text{CaCO}_3]$ .

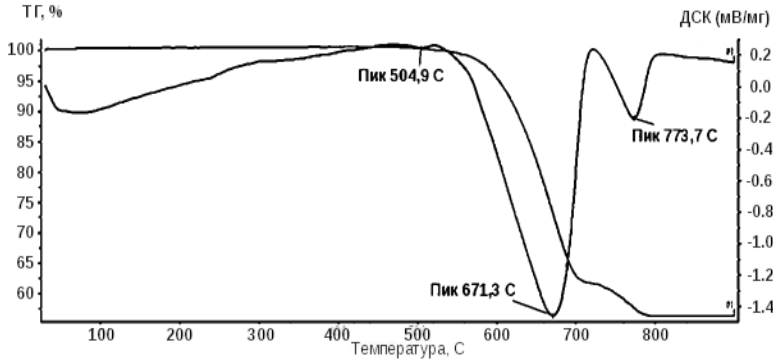


Рисунок 2 – Термограмма отсевов магнезита фракции 0-8 мм Саткинского месторождения

Исходя из данных термограмм, а также результатов микроскопического анализа можно заключить, что исследуемый материал представляет собой сложную систему, в основе которой лежит 75-80%  $MgCO_3$  и ряд непрерывных твёрдых растворов  $MgCO_3-CaCO_3-FeCO_3$ , составляющие 20-25% примеси к основному минералу, образуя изоморфную структуру. Ввиду этого необходимо, в ходе процесса обогащения, разрушить систему твёрдых растворов для получения оксида магния с чистотой не менее 99%, что требует химических методов обогащения. Необходимость обеспечить высокую активность и высокую удельную поверхность приводит к выбору бикарбонатного метода среди других химических методов обогащения.

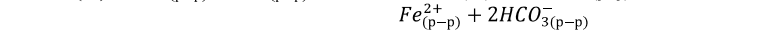
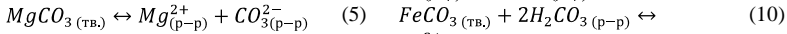
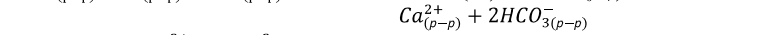
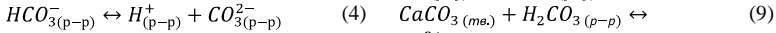
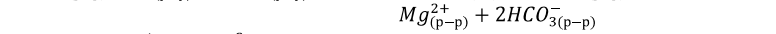
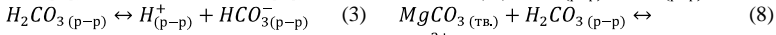
Таким образом, доказывается первое научное положение: отсеvy производства магнезита фракции 0-8 мм представляют собой изоморфные твердые растворы карбонатов кальция и железа в магнезите, что делает примеси  $CaCO_3$  и  $FeCO_3$  трудноудаляемыми и обуславливает необходимость применения бикарбонатного выщелачивания для получения высокочистой магнезии, обладающей высокой активностью и удельной поверхностью.

### **В 3 главе раскрывается второе защищаемое положение.**

Было проведено моделирование процесса бикарбонатного выщелачивания. В основе модели лежат процессы термодинамического равновесия, определяющие состав системы. Кинетические факторы могут влиять на длительность протекания процесса, связаны с площадью поверхности исходного материала, определяемой степенью его измельчения. В основе созданной

математической модели лежит система 10 уравнений реакций, возможных в системе

$MgCO_3 + CaCO_3 + FeCO_3 + H_2O + CO_2(p-p) + CO_2(g)$ :



Для каждой реакции может быть записана константа равновесия, вследствие чего получается система констант равновесия, из которой однозначно могут быть определены концентрации всех компонентов раствора при известной температуре, парциальном давлении углекислого газа и активности фаз твёрдых фаз.

$$P_{CO_2} = E \frac{[CO_2]}{\sum_{i=1}^n c_i} ; K_2 = \frac{[H_2CO_3]}{[CO_2][H_2O]} ; K_3 = \frac{[H^+][HCO_3^-]}{[H_2CO_3]} ; K_4 = \frac{[H^+][CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]} ;$$

$$K_{5-7} = \frac{[Me^{2+}][CO_3^{2-}]}{a_{MeCO_3}} ; K_{8-10} = \frac{[Me^{2+}][HCO_3^-]^2}{a_{MeCO_3}[H_2CO_3]}$$

где E – константа Генри для углекислого газа,  $Me^{2+}$  означает катионы магния, кальция и железа в соответствующих константах равновесия.

Моделирование на основе анализа термодинамических равновесий проводилось при следующих условиях:

1. Извлечение магния должно быть селективным и максимально полным. Нижней границей селективности извлечения было принято соотношение  $Mg:Ca=40:1$ .
2. В исследуемом сырье основной минерал представлен магнезитом и в небольших количествах твёрдыми растворами  $MgCO_3$ - $CaCO_3$ - $FeCO_3$ , в соответствии с определенным химическим составом отсеков.
3. В ходе моделирования, активности фаз учитывались и принимались равные массовым долям соответствующих соединений.

При этом решение системы уравнений на основе констант равновесия выполнялось посредством оптимизации концентраций методом Левенберга-Марквардта. На основе полученной модели была создана программа для ЭВМ (Свидетельство о

государственной регистрации программы для ЭВМ 2019614838), в которой активностью компонентов твердых фаз можно корректировать модель в соответствии с экспериментальными данными для адаптации её к различным типам руд.

Созданная математическая модель была проверена сопоставлением результатов математического расчета и экспериментальных данных, полученных в ходе эксперимента в лаборатории с контролируемыми условиями (температурой и давлением углекислого газа). Была проведена серия опытов по выщелачиванию с определением содержания ионов кальция и магния одновременно комплексонометрическим и кондуктометрическим методами. На рисунке 3 показаны результаты лабораторного эксперимента в сопоставлении с результатами моделирования. Результаты химического анализа получаемого оксида магния представлены в таблице 2.

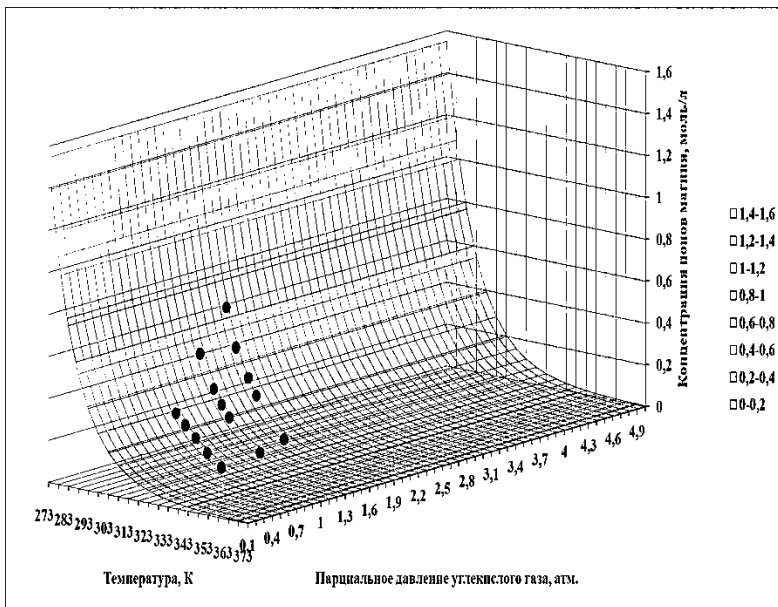


Рисунок 3 - Сравнение результатов эксперимента и результатов моделирования. Поверхность соответствует результатам моделирования. Точками обозначены экспериментальные данные

Таблица 2 – Химический состав оксида магния, полученного по карбонатному (К) и полукарбонатному (ПК) методам

Метод осаднения	Химический состав, мас. %						Йодное число, $\frac{\text{мг-эквI}_2}{100 \text{ г}}$	$\gamma$ , %
	MgO	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ППП		
К	99,23	0,12	0,41	0,19	0,06	0,2	135	14,5
ПК	98,87	0,27	0,48	0,19	0,19	0,2	126	16,7

По итогам сопоставления прогнозов, полученных на основе математической модели, с экспериментальными данным было получено стандартное отклонение 0,002 мас. % для CaO и 0,06 мас. % для MgO. Это соответствует относительной ошибке 15% отн. для CaO и 2,19% для MgO. Данные эксперимента подтверждают результаты моделирования, что позволяет считать математическую модель адекватной для определения рациональных параметров выщелачивания с доверительной вероятностью 95%

Таким образом, доказывается второе научное положение: математическая модель, основанная на процессах термодинамического равновесия и методе Левенберга-Марквардта, для определения параметров процесса бикарбонатного выщелачивания позволяет определить рациональные температуру и парциальное давление углекислого газа для получения магнезии с содержанием MgO не менее 99% с высокой активностью и удельной поверхностью.

**Третье защищаемое положение доказывается в 4 главе.**

Для разработки технологических режимов, на основе разработанной математической модели, были определены рациональные условия для каждого процесса переработки отсевов магнезита: прокаливание, выполняемое при 750 °С в течение 120 минут; бикарбонатное выщелачивание, производимое при температуре 20 °С, в течение 120 минут и парциальном давлении углекислого газа  $1,5 \cdot 10^5$  Па; и прокаливание полученного карбоната при 715 °С в течение 120 минут. Учитывалось, что операция получения карбоната магния должна проводиться в деионизированной воде, что обусловлено необходимостью исключения влияния растворенных катионов (железа, кальция) и анионов (хлорид, сульфат) на химический состав получаемого продукта. Объем воды, подаваемой для получения пульпы, определялся на основе данных исследований, представленных на

рисунке 4, в которых изучалось влияние содержания твердой фазы на извлечение оксида магния.

Технология содержит следующие операции: измельчение до фракции 0,0-0,1 мм; прокаливание, выполняемое при 750 °С в течение 120 минут; бикарбонатное выщелачивание, производимое при температуре 20 °С, в течение 120 минут и парциальном давлении углекислого газа  $1,5 \cdot 10^5$  Па; осаждение из раствора карбоната магния и прокаливание полученного карбоната при 715 °С в течение 120 минут.

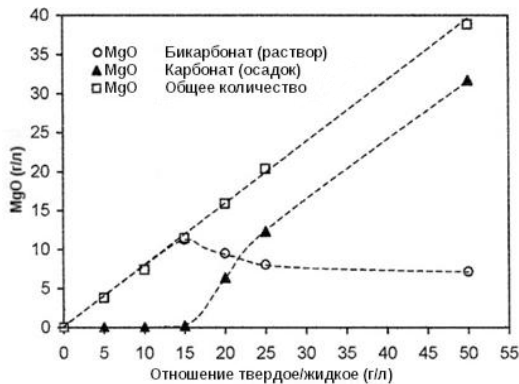


Рисунок 4 – Распределение оксида магния в процессе выщелачивания

нерастворимых примесей и не перешедших в раствор карбонатных кальция и железа. Доля осадка от массы загружаемого материала составляет 20,5 %. Оксид магния извлекается из материала на 87,2 %. Полученный фильтрат, содержащий бикарбонат магния, использовался для получения карбоната магния двумя способами: по первому способу (карбонатному) карбонат магния получали осаждением из раствора посредством нагревания до температуры 90-100°С; по второму (полукарбонатному) – в раствор вводился осадитель фракцией –0,1+0,0 мм. В качестве осадителя рассматривались магнезит марки КМ и оксид магния. Осадитель вводился в соотношении 1:1 по отношению к количеству бикарбоната магния в растворе в пересчете на оксид магния. Промытый осадок карбоната магния подвергался сушке и прокаливанию.

Апробация предложенной технологической схемы производства проводилась в укрупненных лабораторных

Предлагаемая схема технологического процесса представле на на рисунке 5. Отсевы магнезита, измельченные до фракции -0,1+0,0 мм, направляются на первую операцию: выщелачивание – получение карбоната магния. Полученный раствор бикарбоната магния направлялся на фильтрование с целью удаления

испытаниях с использованием больших объемов материала. Общий объем отсевов магнетита, которые были подвергнуты переработке, составил 250 кг. Результаты испытаний с применением карбонатного и полукарбонатного метода представлены в таблице 3.

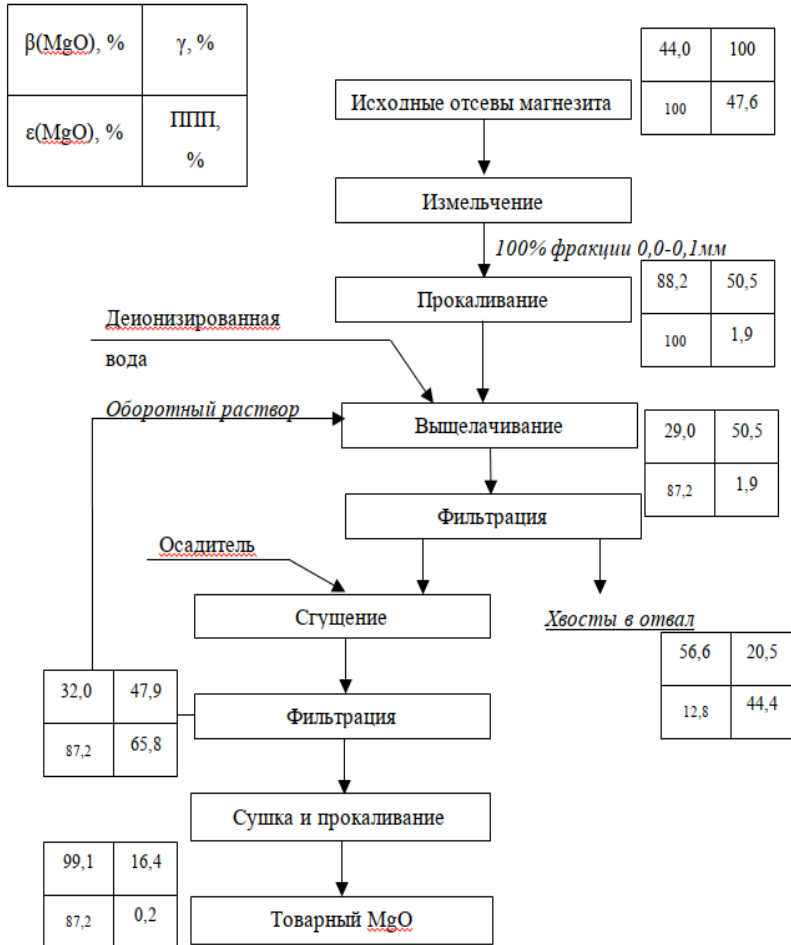


Рисунок 5. Общая технологическая схема переработки отсевов магнетита

Таблица 3 – Средний химический состав магнезии, полученной по карбонатному (К) и полукарбонатному (ПК) методам

Метод / осадитель	Состав, масс %							
	MgO	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ППП	Йодное число, $\frac{\text{мг-эквI}_2}{100 \text{ г.}}$	γ, %
К / нет осадителя	99,20	0,12	0,41	0,19	0,06	0,2	127	13,9
ПК / магнезит	99,01	0,26	0,46	0,18	0,09	0,2	122	16,3
ПК / оксид магния	99,05	0,18	0,43	0,19	0,10	0,2	121	16,6

Таким образом, предложена технология обогащения отсеков магнезита, которая позволяет получить продукт с содержанием MgO не менее 99% и содержит следующие операции: прокаливание измельченных до фракции 0,0-0,1мм отсеков при температуре 750 °С в течение 120 минут; выщелачивание прокалённого продукта в течение 120 минут при температуре 20 °С и парциальном давлении углекислого газа  $1,5 \cdot 10^5$  Па; осаждение из раствора карбоната магния и прокаливание полученного карбоната при 715 °С в течение 120 минут.

### Заключение и выводы

В диссертационной работе решена важная научно-техническая задача – вовлечение в переработку ранее не применявшегося техногенного сырья – отсеков тяжелосреднего обогащения магнезита, а также разработка технологии получения из данного сырья магнезии высокой степени чистоты бикарбонатным методом, позволяющая получать продукт с содержанием MgO не менее 99% с высокой активностью и удельной поверхностью. На основании выполненных исследований получены следующие выводы:

1. Минеральный состав отсеков тяжелосреднего обогащения магнезита представляет собой систему, состоящую из 75-80% карбоната магния и изоморфных твёрдых растворов  $\text{MgCO}_3$ - $\text{CaCO}_3$ - $\text{FeCO}_3$ , а также минеральных включений оксидов кремния и алюминия.
2. В ходе работы были изучены зависимости влияния температуры, парциального давления углекислого газа, состава раствора и состава твёрдой фазы на процесс бикарбонатного выщелачивания оксида магния. Определено, что наибольшее влияние на извлечение



оксида магния из отсеков магнезита в ходе бикарбонатного выщелачивания оказывают температура проведения процесса, соотношение твёрдой и жидкой фаз, в то время как парциальное давления углекислого газа оказывает существенное влияние до достижения значения в  $1,5 \cdot 10^5$  Па, после чего влияет незначительно.

3. По результатам анализа полученных зависимостей построена адекватная математическая модель, позволяющая на основе термодинамических равновесий, с применением метода Левенберга-Марквардта, прогнозировать состав продуктивного раствора, получаемого в процессе бикарбонатного выщелачивания.

4. В ходе исследований определены и подтверждены экспериментально рациональные параметры процессов, используемых при обогащении отсеков магнезита путём бикарбонатного выщелачивания. Для получения высококачественной магнезии с высокой удельной поверхностью предлагается следующая последовательность процессов: измельчение до фракции 0,0-0,1 мм; прокаливание, выполняемое при  $750$  °С в течение 120 минут; бикарбонатное выщелачивание, производимое при температуре  $20$  °С, в течение 120 минут и парциальном давлении углекислого газа  $1,5 \cdot 10^5$  Па; осаждение из раствора карбоната магния и прокаливание полученного карбоната при  $715$  °С в течение 120 минут.

5. Разработанная технология переработки отсеков тяжелосреднего обогащения магнезитов позволяет обеспечить получение высококачественного оксида магния (массовая доля основного компонента не менее 99%), обладающего высокой удельной поверхностью, которая характеризуется значением йодного числа

$$121 \frac{\text{мг-экв } I_2}{100 \text{ г.}}$$

6. Предложенная технология опробована в лабораторных условиях на непрерывной установке. В результате были получены следующие показатели: извлечение MgO – 87,2%; массовая доля MgO в готовом продукте – 99,1%; выход товарного оксида магния – 16,6%.

**Основные научные и практические результаты диссертации изложены в следующих опубликованных работах автора**

**В изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus:**

1. Highly reactive magnesia production: modelling and experiment / M.Y. Turchin, A.V. Masalimov, A.N. Smirnov, I.A. Grishin // *Refractories and Industrial Ceramics*. – 2019. – Т. 60. № 3. – С. 254-257.

**В изданиях, рекомендуемых ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ:**

1. Смирнов, А.Н. Характеристика отсевов тяжелосредного обогащения магнезита как перспективного техногенного сырья / А.Н. Смирнов, И.А. Гришин, А.В. Масалимов. – DOI: 10.21440/0536-1028-2021-2-88-93.– Текст: непосредственный // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. – 2021. – № 2. – С. 88–93.

2. Анализ состояния сырьевой базы для обнаружения перспективных источников получения оксида магния в процессах обогащения / А.В. Масалимов, А.Н. Смирнов, Н.Н. Орехова, И.А. Гришин.– DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-3-16-25.– Текст: непосредственный // *Вестник Забайкальского государственного университета*. – 2021. – Т. 27. №3. – С. 16-25.

**В прочих изданиях:**

1. Изучение возможности переработки отходов обогащения магнезита с получением высокоактивной магнезии / А.Н. Смирнов, В.С. Великанов, И.А. Гришин, А.В. Масалимов // *Горная промышленность*. – 2018. – №6 (142). – С. 83-85.

2. Масалимов, А.В. Анализ возможности обогащения отсевов магнезита для получения высокочистого оксида магния / А.В. Масалимов // *Актуальные проблемы горного дела*. – 2019. – №1 (7). – С. 49-52.

3. Определение рациональных параметров бикарбонатного способа получения магнезии / А.Н. Смирнов, А.В. Масалимов, В.И. Сысоев, И.И. Зайнуллин // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: Тезисы докладов 77-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 22–26 апреля 2019 года.*– Магнитогорск: Изд-во Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, 2019. – С. 228-229.

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2019614838 Российская Федерация. Программа расчета

термодинамических равновесий углекислотного выщелачивания / Масалимов А.В., Смирнов А.Н., Гришин А.И.; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение профессионального образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». – № 2019613376 ; заявл. 02.04.2019 ; опубл. 15.04.2019. – 1 с.