

# Повышение производительности цикла измельчения фабрики Minorga с помощью математического моделирования

S. Ersayin (Университет Миннесоты)

W. M. Bond, R. Strukel, J. Arola (Mittal Steel)

B. Kettunen (Noramco Engineering)

## Аннотация

Описываемое исследование было инициировано в рамках процедуры опробования на фабрике. К данным, подготовленным в процессе анализа результатов опробования, были применены статистические модели материального баланса. Обработанные данные затем использовались для исследования производительности и калибровки моделей. Исследование результатов материального баланса показало, что цикл с шаровой мельницей на фабрике Minorga был узким местом, ограничивающим производительность. Команда инженеров разработала и смоделировала ряд идей по оптимизации производительности путем снижения нагрузки на цикл с мельницей. Некоторые гипотезы имели прямое воздействие на схему, затрагивая размер шаров, объем заполнения шарами, критическую скорость, процент твердого в мельнице, использование более эффективных гидроциклонов, замену гидроциклонов стэк сайзерами. Другие, включая использование низкоинтенсивных барабанных магнитных сепараторов для сухого обогащения, оптимизацию мелкого грохочения, и отдельное измельчение надрешетного продукта мелкого грохочения, хоть и оказывали не прямое воздействие, тем не менее также были смоделированы и проверены. Работы выполнялись с помощью новой версии программного пакета для моделирования процессов обогащения полезных ископаемых UsimPac. Новая версия включала математические модели магнитной сепарации, гидросепарации и мелкого грохочения. Несмотря на то, что основной целью моделирования было снижение нагрузки на цикл с мельницей, специалисты также выполнили комплексное моделирование всей фабрики для проверки влияния таких изменений на другие потоки и моделирования эффекта от возросших объемов питания.

Результаты моделирования показали, что все изменения в разной степени повышали производительность цикла с мельницей и всей фабрики. Вместе с тем, наиболее многообещающим и реалистичным решением было использование шаров меньшего размера с более эффективными гидроциклонами. Изменение, касающееся применения шаров меньшего размера, было внедрено на фабрике немедленно после исследования и привело к существенному увеличению производительности. Процедуру опробования фабрики повторили для расчета и подтверждения положительного эффекта от внедрения этой идеи. Расчет материального баланса показал хорошую корреляцию между производительностью, измеренной в рамках опробования, и производительностью, прогнозируемой с помощью математической модели. В результате внедрения изменений, полученных на основе моделирования в пакете UsimPac, производительность фабрики была увеличена более чем на 10%. Дальнейшие улучшения ожидаются после замены действующих пятнадцатидюймовых гидроциклонов на более эффективные двадцатидюймовые.

## Введение

Фабрика Minorga ежегодно обрабатывает примерно 9 миллионов тонн сырой магнетитсодержащей руды (Таконита) и производит порядка 2.8 миллиона тонн, содержащей менее 4% двуокиси кремния. Фабрика состоит из циклов магнитной сепарации и флотации. Цикл магнитной сепарации представляет собой три параллельные линии и производит магнитный концентрат, содержащий 6%-7% двуокиси кремния. Схема цикла магнитной сепарации изображена на рисунке 1. Мелкая руда (~25мм), поступая из дробильной фабрики, проходит две стадии измельчения и три стадии магнитной сепарации. Магнитный концентрат со всех трех линий смешивается и подается на цикл флотации для выделения двуокиси кремния, с использованием аминов в качестве собирателей. Флотация проводится в две стадии: камеры основной флотации производят конечный

магнетитовый концентрат, в то время, как хвосты уходят на камеры контрольной флотации для дальнейшего извлечения магнетита (Yersain et al. 2005).

Конечным продуктом фабрики являются обожженные железорудные окатыши. Конечный концентрат из циклов обогащения поступает на фильтрацию, окомкование и уплотнение для подготовки конечного продукта. Завод окатышей обладает достаточной производительностью. Более того, производство окатышей ограничено по концентрату. Рассчитано, что производство окатышей может легко отработать 3 миллиона тонн концентрата в год. Что и послужило поводом для инженеров искать пути повышения производительности обогатительной фабрики на 10%.

Такие особенности процесса обогащения железной руды, как уменьшение размеров и концентрация, а также отсутствие надежных моделей магнитной сепарации и других операций, специфичных для обогащения железной руды, ранее не позволяли соответствующим фабрикам в полной мере использовать преимущества методик математического моделирования процессов. Находясь под впечатлением от значительных улучшений производительности, достигнутых компанией National Steel Pellet Company в рамках комбинированных исследований, включающих как математическое моделирование, так и промышленные эксперименты (Wennen, Nordstrom, Murr 1995), производители железной руды из Северной Миннесоты решили организовать центр по моделированию обогащения для развития математических моделей, необходимых для надежного моделирования их фабрик и для оказания услуг с использованием математического моделирования. Департамент природных ресурсов Миннесоты выделил средства для организации центра на базе Университета Миннесоты. Со временем, по итогам разработки базовых математических моделей магнитных сепараторов, гидросепараторов и мелкого грохочения, центр был готов к надежному моделированию фабрик по обогащению таконита. В 2002 году Департамент энергетики США выделил существенное финансирование проекта демонстрации того, каким образом моделирование процессов обогащения полезных ископаемых может быть применено для повышения производительности фабрик по обогащению железной руды. Настоящая статья обобщает большой объем того исследования в части повышения эффективности цикла измельчения с шаровой мельницей.

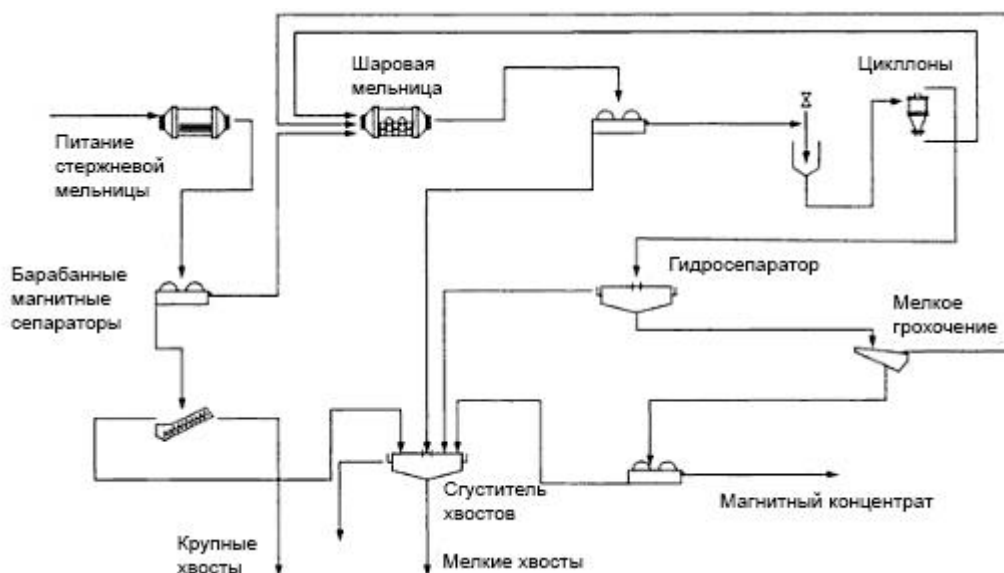


Рисунок 1. Исходная схема цикла магнитной сепарации фабрики Minorca.

### Исследование на основе математического моделирования

Исследование было инициировано в рамках процедуры опробования на фабрике и было выполнено в соответствии с типовыми этапами планов повышения эффективности, включающих анализ проб, расчет материального баланса, оценку производительности, разработку различных гипотез оптимизации, создание реалистичной математической модели фабрики, проверку и выбор

наиболее адекватных идей, проверку результатов. Детальное описание указанных этапов приведено ниже.

### **Опробование фабрики и анализ проб**

Для подтверждения того, что фабрика работает в устоявшемся состоянии, до процедуры комплексного опробования были проверены операционные условия. Затем были взяты пробы из всех потоков в одной из линий магнитной сепарации, начиная с питания стержневой мельницы и заканчивая магнитным концентратом. Пробы забирались каждый час в рамках одной смены. Хотя опробование фабрики подразумевает опробование и цикла флотации для понимания возможных эффектов изменения в цикле магнитной сепарации на производительность цикла флотации, эта часть исследования была исключена из настоящей статьи ввиду того, что она посвящена исключительно измельчению. Детали цикла флотации могут быть найдены в другом материале (Ersayin et al. 2005). Опробование фабрики повторили для второй смеси руды, которая обрабатывается в другое время года. Однако, в настоящей статье представлены данные только по первой смеси, поскольку они показывали, что фабрика во время опробования работала на максимальной производительности. Именно такие данные формируют качественный базис для сравнения экспериментальных данных с результатами математического моделирования, направленного на нахождение и устранение узких мест в схеме.

Пробы потоков были немедленно отфильтрованы и высушены на фабрике. Затем их направили в профильную лабораторию Университета Миннесоты для анализа, включающего анализ размеров, анализ общего содержания железа в классах крупности, анализ на аппаратах Satmagan и анализ содержания двуокиси кремния. Для оценки эффективности цикла измельчения с шаровой мельницей и для понимания отправной точки для опробования будущей фабрики были выполнены тесты измельчаемости Бонда для шаровых мельниц. В рамках таких тестов, в качестве питания шаровой мельницы в цикле измельчения, был использован концентрат, полученный на разгрузке барабанного магнитного сепаратора.

### **Материальный баланс и оценка производительности**

Размерные и химические данные, полученные в результате анализа проб, были использованы для расчета и согласования материального баланса с помощью статистического алгоритма пакета UsimPac. Основываясь на измеренной скорости подачи питания в стержневую мельницу на уровне 350 т/ч, были рассчитаны все потоки внутри цикла. В целом, данные полученные в результате согласования материального баланса очень хорошо коррелировали с измеренными значениями, что свидетельствовало о качественном опробовании. Единственным узлом, для которого материальный баланс показал некую проблему, был барабанный магнитный сепаратор. Это было связано с сложностью получения представительной пробы из большого объема потока разгрузки стержневой мельницы. Задача дополнительно осложнялась тем, что поток содержал крупные частицы. Результаты согласования материального баланса по основным потокам показаны в таблице 1. Затем, исходя из данных материального баланса и расходов потоков, были рассчитаны потери железа в хвостовых потоках и извлечение магнитного концентрата (см. таблицу 2). Цикл показывал хорошее извлечение по магнитному железу на уровне в 96,2%. Большинство потерь происходило на барабанном магнитном сепараторе и крупных хвостах. Соотношение циркуляционной нагрузки (соотношение песков гидроциклона к сливу) в цикле с мельницей составляло 380%. Фабричные данные также показали, что установленные гидроциклоны работали плохо (байпас составлял более 40%, см. рисунок 2). Мелкая фракций циркуляционной нагрузки шла с мелкого грохочения. Из-за эффекта плотности, проскакивающие мелкие частицы были мелкой фракцией двуокиси кремния, подаваемой затем назад на шаровую мельницу, что было весьма нежелательно. Фабричные данные показали, что пески гидроциклона содержали порядка 25% материала, сопоставимого с концентратом по качеству (см. таблицу 3).

Как показано на рисунке 2, мелкое грохочение не было особенно эффективно. Такие грохоты также работали в качестве концентраторов, отделяющих крупные частицы с двуокисью кремния, поэтому мелкие частицы с двуокисью кремния попадали в магнитный концентрат. Их отработка с высоким процентом твердого в питании приводила к содержанию мелких частиц с двуокисью кремния в продукте, что в свою очередь также способствовало высокому байпасу.

Поток	Расход (т/ч)	Магнитное железо (%)	Двуокись кремния (%)
Питание	350	25.8	45.5
Концентрат барабанного сепаратора	237	37.5	33.9
Разгрузка шаровой мельницы	1,536	48.0	23.9
Питание гидроциклона	1,454	50.6	21.3
Слив гидроциклона	303	54.0	16.9
Нижний продукт гидросепаратора	290	56.4	14.6
Подрешетный продукт мелкого грохочения	142	63.6	9.6
Магнитный концентрат	135	64.5	6.96

Таблица 1. Данные согласованного материального баланса для основных потоков.

Поток	Расход (%)	Извлечение (%)
Хвосты барабанного сепаратора	32.5	1.9
Крупные хвосты	23.4	1.3
Верхний продукт гидросепаратора	3.7	0.2
Хвосты последней стадии магнитной сепарации	1.9	0.4
Магнитный концентрат	38.6	96.2

Таблица 2. Относительный расход и извлечение железа в хвостовых потоках и магнитном концентрате.

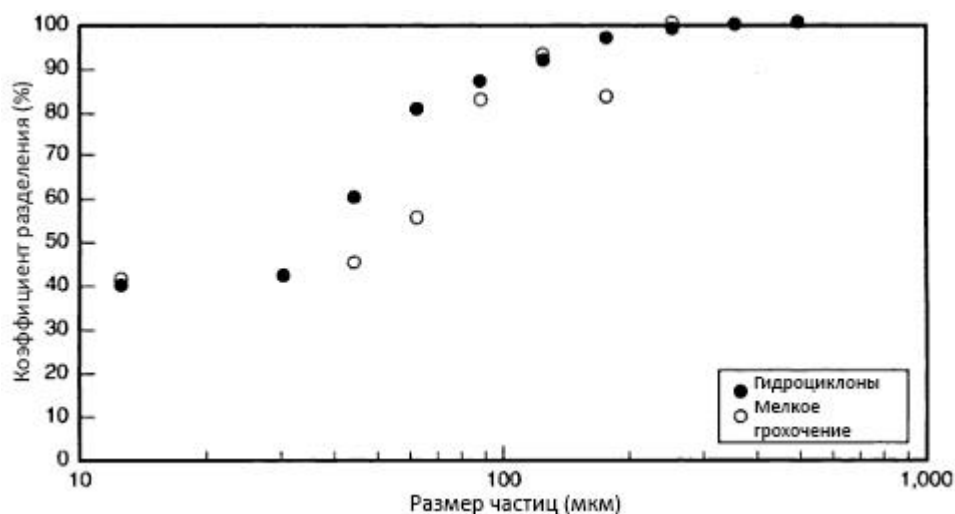


Рисунок 2. Кривые разделения для гидроциклонов и для грохотов для мелкого грохочения. Кривые отражают текущую операционную деятельность без корректировки для байпаса воды в пески.

### Определение узких мест

Целью исследования являлось повышение производительности фабрики, поэтому определение узких мест, ограничивающих производительность, было крайне необходимо. На соответствующем совещании, в котором приняли участие технологи и операторы производства, были определены три критерия, влияющих на объем подачи питания для стержневой мельницы: (1) производительность насоса питания гидроциклона, (2) производительность грохотов для мелкого грохочения и (3) флотация концентрата двуокиси кремния. Данные согласованного материального баланса показали максимальные значения первых двух пунктов, что соответствовало 1450 – 1500 т/ч при 45% твердого и 300 т/ч при 55% твердого соответственно. Флотация концентрата двуокиси кремния контролируется в основном путем корректировки количества аминов. Однако, когда такой формат контроля не обеспечивает необходимого уровня двуокиси кремния, объем питания стержневой мельницы сокращается.

Размер (мкм)	Вес (%)	Двуокись кремния (%)
150	42.4	36.9
105	15.2	23.5
75	14.2	12.2
53	12.6	5.0
38	5.5	4.1
25	2.5	3.0
-25	7.6	4.8

Таблица 3. Содержание двуокиси кремния в классах крупности в песках гидроциклонов.

### Гипотезы оптимизации производительности

Оценка производительности показала, что цикл измельчения с шаровой мельницей является существенным ограничивающим фактором для общей производительности фабрики. Для увеличения общей производительности, необходимо сократить циркуляционную нагрузку. Этого можно достичь через более оптимальное измельчение, классификацию в гидроциклонах и/или, в меньшей степени, через оптимизацию мелкого грохочения.

Для повышения эффективности измельчения было предложено несколько идей. Существующие электромоторные шаровые мельницы имеют достаточную мощность. Это могло создать возможность для увеличения мельницами энергопотребления путем увеличения объема шаровой загрузки и/или критической скорости. Анализ данных по шаровой мельнице показал, что подаваемые новые шары были слишком крупными. Использование шаров меньшего размера могло увеличить скорость измельчения и, как следствие, снизить объем циркуляционной нагрузки. Другая гипотеза для повышения эффективности измельчения заключалась в увеличении процента твердого в питании. Для питания с увеличенным процентом твердого время пребывания в мельнице будет больше и, как следствие, измельчение будет более эффективным. Однако, этот параметр было сложно контролировать, поскольку для этого пришлось бы контролировать процент твердого во всех потоках, питающих мельницу – концентрат с барабанного магнитного сепаратора, пески гидроциклона, надрешетный продукт грохотов для мелкого грохочения. Тем не менее, операторы завода могли попробовать удерживать процент твердого на высоком уровне, если такой подход позволял получить значительные улучшения.

Для повышения эффективности классификации основной идеей была установка второй группы гидроциклонов (см. рисунок 3), которая позволила бы реализовать вторичное отделение мелкого продукта из песков существующих гидроциклонов. В последующем было рассмотрено несколько дополнительных возможностей. Среди них были модернизация существующих пятнадцатидюймовых гидроциклонов с целью повышения их эффективности, использование более эффективных двадцатидюймовых гидроциклонов и замена гидроциклонов более эффективными аппаратами для сепарации по размеру, известными, как стэк сайзеры. Один из производителей гидроциклонов утверждал, что эффективность существующих гидроциклонов может быть повышена через модернизацию, заключающуюся в замене существующей конической части с постоянным наклоном, на две конические секции с различными углами наклона. Также было предположено, что новая группа гидроциклонов большего диаметра с двумя коническими частями может быть в дальнейшем улучшена для еще большего повышения эффективности классификации. Радикальным решением неэффективной классификации могло бы быть использование стэк сайзеров, которые представляют собой высокопроизводительные грохоты с прочными панелями грохочения (Valine and Wennep 2002). В последние годы, они рассматривались в качестве альтернативы гидроциклонам в силу своей эффективности в части сепарации.

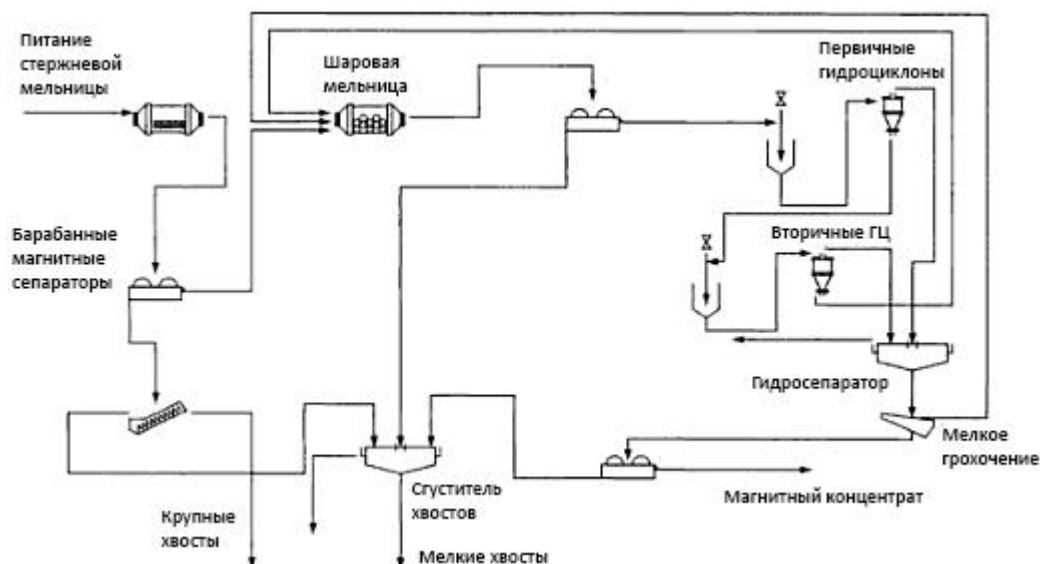


Рисунок 3. Модифицированная схема для отработки гипотезы использования дополнительной группы гидроциклонов.

Другие гипотезы увеличения эффективности заключались в сухой барабанной магнитной сепарации, отдельном дополнительном измельчении надрешетного продукта грохотов для мелкого грохочения и разжижении питания грохотов для мелкого грохочения. Сухая магнитная сепарация включает отделение практически пустой породы с низким содержанием полезных минералов из руды перед подачей ее на фабрику. Как правило, питание стержневой мельницы обрабатывается низкоинтенсивными барабанными магнитными сепараторами для сухого обогащения, и только магнитная фракция попадает в качестве питания на фабрику (Wu 1997). Такой подход не воздействовал бы на цикл измельчения напрямую, однако, он обладал потенциалом в части увеличения производства концентрата путем удаления значительного объема частиц, переносящих двуокись кремния, из питания фабрики. Как следствие, увеличилось бы содержание полезных минералов в питании, и энергия измельчения расходовалась бы на правильные частицы. Поскольку надрешетный продукт грохотов для мелкого грохочения является относительно мелким материалом, обычно не ожидается, что до попадания в циркуляционную нагрузку мельницы он проходит процесс дополнительного измельчения и раскрытия. Как правило, так поступают только с значительно более крупным сырьем. В качестве одной из гипотез оптимизации была рассмотрена возможность создания такого отдельного цикла дополнительного измельчения для этого потока (см. рисунок 4). Вертикальные мельницы успешно используются для решения таких задач. О значительных улучшениях производительности при использовании таких решений уже докладывали (Benner 1998). Такая модификация однозначно снизит нагрузку в цикле с мельницей. Несмотря на то, что разжижение питания грохота способствует повышению содержания двуоксида кремния в магнитном концентрате, это может снизить нагрузку на шаровую мельницу. Действительно, объем надрешетного продукта для грохотов мелкого грохочения снижается за счет уменьшения байпаса и увеличения значения точки отсечения для гидроциклонов. При этом, в случае если преимущества этой гипотезы будут обоснованно высокими, небольшое повышение содержания диоксида кремния может быть отработано в последующем процессе флотации.

### Моделирование и расчет фабрики

Для выполнения расчетов была использована новая версия программного пакета UsimPac. Среди улучшений были модели магнитного сепаратора, гидросепаратора и мелкого грохочения, разработанные в профильной лаборатории Университета Миннесоты (Ersayin 2003, 2004; Pletka 2004). При моделировании гипотезы оптимизации с применением сухого магнитного обогащения, для расчета свойств питания стержневой мельницы были использованы данные предварительного промышленного испытания (Wu 1997). Для тестирования гипотез с добавлением второй батареи гидроциклонов, модернизацией существующих гидроциклонов и замены существующих гидроциклонов на гидроциклоны большего диаметра, ожидаемая производительность и

параметры оборудования были предоставлены производителем гидроциклонов. Указанные данные затем использовались в модели гидроциклона Плитта (Plitt model), реализованной в пакете UsimPac (BRGM 2003). Такой же подход использовался для моделирования стэк сайзеров, компания Derrick для использования в исследовании предоставила тестовые данные для сита 0,15мм. На основе тестовых данных были построены кривые разделения для каждого компонента. Эти кривые сформировали математический базис для расчетов. Для моделирования стержневой и шаровой мельницы, UsimPac использует кинетическую модель, комбинируемую с энергетическим подходом. Модель корректирует скорости измельчения в соответствии с изменениями в потреблении энергии, которые могут возникнуть из-за изменений в операционных условиях (BRGM 2003). Тем не менее, эта модель не учитывала распределения шаров по размерам в мельнице. Для устранения этого недостатка, с помощью модели шаровой мельницы JKTech (Napier-Munn et al. 1996), было рассчитано и использовано распределение для шаров различных размеров. В рамках тестирования идеи дополнительного измельчения надрешетного продукта грохотов для мелкого грохочения, была использована модель шаровой мельницы с параметрами модели основной шаровой мельницы в схеме. Целью тестирования конкретно этой идеи было получение на выходе из такого отдельного цикла измельчения гранулометрического распределения, схожего с распределением в цикле магнитной сепарации. При этом число и геометрия гидроциклонов корректировались до тех пор, пока указанная цель не была достигнута.

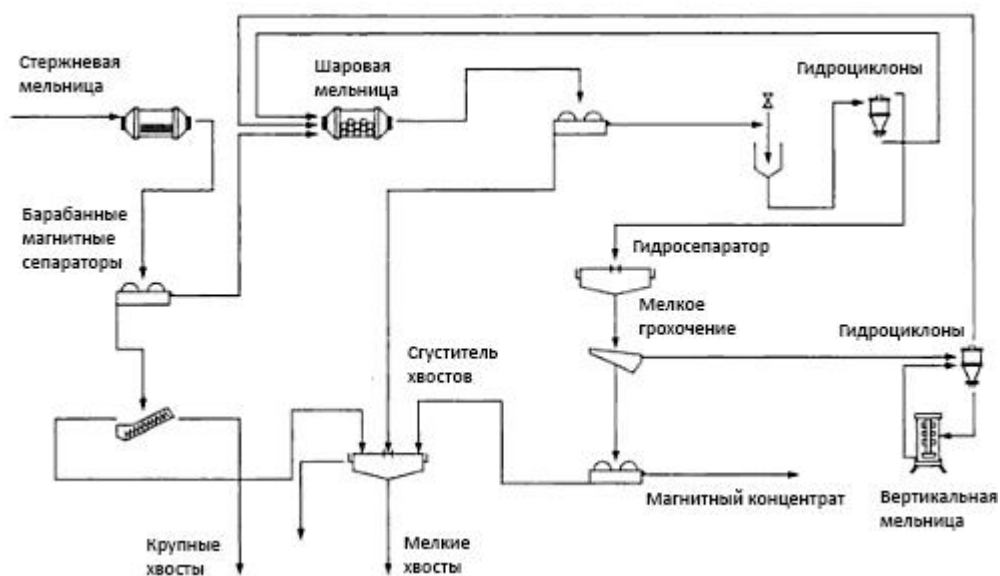


Рисунок 4. Модифицированная схема для отработки гипотезы отдельного цикла измельчения для надрешетного продукта грохотов для мелкого грохочения.

Для целей моделирования было сделано предположение, что руда состоит из двух компонент, а именно, из магнетита и пустой породы. Распределение содержания магнитного железа по классам крупности, полученное в результате согласования материального баланса, было конвертировано в магнетит путем деления атомного веса на 0,7236. Все оставшееся было принято за пустую породу. В конечном итоге, эмпирические уравнения, разработанные с учетом результатов согласования материального баланса, были использованы для расчета содержания диоксида кремния в каждом потоке по итогам моделирования модели с таким двухкомпонентным сырьем.

В качестве первого шага были смоделированы текущие операционные условия. Изначально, наиболее подходящие параметры модели для каждого узла были рассчитаны индивидуально. Затем, параметры моделей были откалиброваны для получения хорошего соответствия между расчетными и измеренными данными по расходам потоков, содержанию компонент, гранулометрическим распределениям. Калибровка параметров модели шаровой мельницы, для достижения соответствия между расчетными и измеренными данными, была серьезной задачей в связи с наличием нескольких циркуляционных потоков. В конечном итоге было достигнуто отличное соответствие для всех трех, указанных выше, типов данных.

Ниже приведен список смоделированных гипотез оптимизации:

- Сухое магнитное обогащение
- Повышение эффективности гидроциклонов
  - Две батареи
  - Модернизация существующих аппаратов
  - Замена существующих на гидроциклоны большего диаметра (20 дюймов)
  - Замена гидроциклонов на стэк сайзеры
- Повышение эффективности шаровой мельницы
  - Снижение размера шаров до 1,75 дюйма и 1,5 дюйма
  - Увеличение объема шаровой загрузки
  - Увеличение критической скорости
  - Изменение % твердого в питании
- Разжижение питания грохотов для мелкого грохочения
- Дополнительно измельчение надрешетного продукта грохотов для мелкого грохочения

Для каждой гипотезы был проведен расчет на базе комплексной модели фабрики. Для упрощения сравнения, существующие операционные условия сохранялись для всей остальной фабрики. Эффект измерялся по трем критериям: скорость разгрузки шаровой мельницы, извлечение магнитного железа, содержание диоксида кремния в магнитном концентрате.

#### **Результаты расчетов, выбор наиболее реалистичных гипотез оптимизации, внедрение соответствующих изменений на фабрике**

Результаты исследования обобщены в таблице 4. Для количественной оценки эффекта от увеличения объема шаровой загрузки, критической скорости и процента твердого в питании шаровой мельницы, разжижения питания для мелкого грохочения, которые изначально равнялись соответственно 34%, 0,667, 68,5% и 56,5%, были проведены несколько расчетов. Для этих переменных в таблице 4 представлен только один набор результатов расчетов. Он соответствует 38% шаровой загрузки, критической скорости в 0,75, 72% твердого в питании шаровой мельницы, и 52% твердого в питании мелкого грохочения.

В целом, все гипотезы обладали в той или иной степени положительным эффектом в части снижения циркуляционной нагрузки шаровой мельницы, создавая тем самым возможность увеличения производительности фабрики. Для идеи сухой магнитной сепарации, объем питания стержневой мельницы должен был быть снижен до 330 т/ч для поддержания текущего уровня циркуляционной нагрузки, за счет более крупного питания. Поскольку узкое место было в шаровой мельнице, сухая магнитная сепарация пустой породы (включая диоксид кремния) не привела к значительному снижению нагрузок около шаровой мельницы. Тем не менее, моделирование показало, что использование сухой магнитной сепарации увеличит объем производства концентрата за счет увеличения крупности питания стержневой мельницы.

Увеличение энергопотребления шаровой мельницы за счет увеличения объема шаровой загрузки или увеличения критической скорости производило тот же эффект. Однако, увеличение шаровой загрузки потребует сужения диаметра разгрузочного кольца, поскольку шаровая мельница имеет тенденцию к разгрузке шаров при превышении шаровой загрузки в 35%. Для другого варианта была необходима замена зубчатого вала. Преимущества повышенного процента твердого в питании, с учетом риска превышения той степени вязкости, при которой измельчение становится неэффективным, были относительно малы. Наиболее значительных преимуществ можно было достичь путем простого снижения размера шаров с 2 дюймов до 1,5 дюймов.

С точки зрения повышения эффективности, в случае 3 гидроциклонов, моделирование использования второй батареи и модернизации существующих аппаратов показали схожие



результаты. Было определено, что замена действующих гидроциклонов на двадцатидюймовые приведет к лучшей классификации, ощутимо снизит нагрузку на шаровую мельницу, и создаст пространство для повышения производительности фабрики.

Несмотря на то, что стэк сайзеры продемонстрировали значительное снижение загрузки мельницы, детальные данные показали почти двукратное увеличение последующих потоков даже при питании стержневой мельницы в 350 т/ч. Увеличение значения точки отсечения (более крупное отсечение) по сравнению с существующим приводило к более высоким объемам последующих потоков. Вывод – данная гипотеза должна была предусматривать не только замену гидроциклонов стэк сайзерами но и удваивание всего последующего оборудования.

Разжижение питания грохотов для мелкого грохочения приводило к относительно незначительным улучшениям, увеличивая при этом содержание двуокси кремния в магнитном концентрате. Такой подход можно было брать за основу при перегрузке цикла. Отдельное измельчение надрешетного продукта грохотов для мелкого грохочения имело большой потенциал в части увеличения производительности фабрики.

Использование шаров размером 1,5 дюйма являлось наиболее реалистичной гипотезой с точки зрения оперативной реализации на фабрике. Оно обладало большим потенциалом для увеличения производительности фабрики. Несмотря на то, что шары меньшего размера более дорогостоящие, получаемые преимущества легко перекрывали такие дополнительные затраты. Эта идея также обладала несколькими преимуществами: она не требовала капитальных вложений, она не увеличивала энергопотребление, не возникало проблем с объемом последующих потоков. Кроме того, ее было очень легко реализовать. Как следствие именно эта идея была выбрана для скорейшей реализации на фабрике. Также было решено заменить действующие гидроциклоны на более объемные.

Гипотеза оптимизации	Скорость разгрузки мельницы (т/ч)	Магнитный концентрат	
		Извлечение (%)	SiO <sub>2</sub> (%)
Действующая схема	1,536	96.2	6.96
Сухое магнитное обогащение	1,542	96.6	6.92
Вторая батарея ГЦ	1,245	96.1	7.35
Модернизация существующих ГЦ	1,296	96.1	7.31
Двадцатидюймовые ГЦ	1,149	96.0	7.65
Стэк сайзеры (0,15мм)	1,039	96.2	7.24
Шары 1,75 дюйма	1,299	96.2	6.93
Шары 1.5 дюйма	1,085	96.2	7.00
Увеличенный объем шаровой загрузки (38%)	1,395	96.3	6.99
Увеличенная критическая скорость (0,75)	1,282	96.3	7.00
% твердого в питании шаровой мельницы (72%)	1,386	96.3	6.99
Разжижение питания мелкого грохочения (52%)	1,382	96.2	7.28
Отдельное измельчение надрешетного продукта	835	96.2	6.53

Таблица 4. Итоги расчетов.

После того как наиболее подходящие гипотезы оптимизации были выбраны, в программе было произведено несколько контрольных расчетов для проверки чувствительности модифицированной схемы фабрики к крупности и гранулометрическому составу питания фабрики, увеличенному объему питания цикла флотации. Контрольные расчеты показали, что увеличение производительности в 10% является достижимой целью, даже при условии некоторых изменений в объеме питания фабрики, крупности и содержания ценного компонента в питании.

## Проверка результатов моделирования

В качестве предупредительного шага, одну из линий частично (на 30%) перевели на шары 1,5 дюйма. После эксплуатации в 4 месяца без каких-либо накладок на линии, на фабрике было проведено ограниченное опробование с целью проверки факта достижения улучшений, смоделированных для такой модификации. Для моделирования шаровой мельницы с 30% загрузкой 1,5 дюймовыми шарами были использованы данные согласованного материального баланса по объемам потоков и гранулометрическим распределениям. Наблюдалось отличное соответствие расчетных и измеренных гранулометрических распределений (см. рисунок 5). Тесты Бонда показали, что с измельчаемостью шаровой мельницы не произошло каких-либо существенных изменений, несмотря на то, что между периодами опробования прошло около 3х лет. Воодушевленные наблюдаемым увеличением производительности в этой конкретной линии, было решено перевести все три линии фабрики на 1,5 дюймовые шары. Окончательное опробование фабрики было выполнено, когда 1,5 дюймовые шары эксплуатировались уже около 1 года. В течение этого периода, замеры производительности фабрики отчетливо показали повышение более чем на 10%. Это увеличение повлекло за собой снижение энергопотребления на производство тонны концентрата. Однако, это также показало, что предшествующие аппараты могут иметь проблемы с подачей увеличенного объема руды на цикл. К сожалению, опробование фабрики необходимо было выполнить именно в такое время. Линия работала с питанием стержневой мельницы в 360 т/ч. Тем не менее, измеренные фабричные данные позволяли проверить результат моделирования, невзирая на объем питания.

Опробование фабрики и анализ проб выполнялись по тем же процедурам, как и изначальное опробование. Измеренные потоки и записанные операционные условия ввели в статистический алгоритм материального баланса для его согласования. Условия в момент опробования были смоделированы с использованием параметров моделей, определенных в исходных данных. Следующие данные описывают новые, измененные условия: скорость подачи питания стержневой мельницы, гранулометрическое распределение питания стержневой мельницы, уровень загрузки шаровой и стержневой мельниц, % твердого в питании гидроциклонов и мелкого грохочения. Объемы загрузки мельниц не были напрямую измерены. Вместо этого, они были откалиброваны для получения измеренных объемов потребления энергии для каждой мельницы. Как показано в таблице 5, этот расчет показал очень хорошее соответствие данных согласованного материального баланса в части скоростей потоков, содержания полезных минералов и извлечения, тем самым подтверждая результаты, полученные в рамках исходного моделирования.

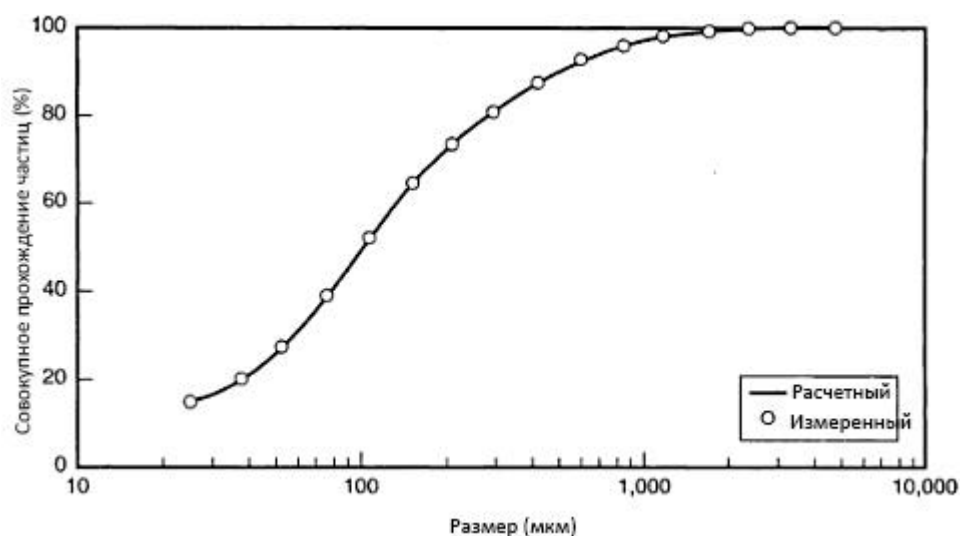


Рисунок 5. Гранулометрическое распределение разгрузки шаровой мельницы: сравнение расчетного с измеренным после замены шаров на 1,5 дюймовые.

Сравнение расчетных и измеренных данных также было выполнено для отдельных аппаратов. Только магнитные сепараторы показали неудовлетворительное расхождение с расчетными данными. Возможно, это связано с изменением характеристик раскрытия и/или способом использования сепараторов на момент контрольного исследования - между исследованиями (изначальным и контрольным) прошло 4 года. Каждый аппарат был отдельно промоделирован и расчетные гранулометрические распределения ключевых потоков сравнили с измеренными (см. рисунок 6). Расчетное гранулометрическое распределение разгрузки шаровой мельницы показало отличное соответствие измеренным данным. Другие расчетные и измеренные параметры также показали хорошее соответствие, подтверждая результаты исходного исследования.

### Текущая ситуация

Замена пятнадцатидюймовых гидроциклонов на двадцатидюймовые завершена. Выполнена оптимизация управления фабрикой с учетом применения новых гидроциклонов. Как было показано ранее, после таких модификаций некоторые проблемы на уровне предшествующих операций стали очевидны. Для решения указанных проблем уже были приняты меры. Чтобы дать возможность циклу измельчения обрабатывать больший объем питания, была инициирована замена действующих барабанных магнитных сепараторов на более производительные четырехфутовые машины. Также были выполнены модификации в дробильной фабрике. Кроме этого, была проверена производительность горного оборудования на предмет выработки большего объема руды.

### Планы на будущее

Следующим шагом является разработка контрольной стратегии оптимизации эффективности схемы. Для этого определено будет использовано математическое моделирование. Предварительные расчеты, выполненные до замены гидроциклонов, показали, что программный пакет обладает отличной возможностью имитировать реальные операции фабрики. Однако, существующая (на момент публикации, 2006 год) модель гидроциклона не справилась с моделированием новых двадцатифутовых аппаратов после их пуско-наладки. Более того, стала очевидной необходимость изменения текущей модели гидроциклонов, для получения возможности смоделировать действующие машины. Контрольная стратегия, основанная на математическом моделировании, будет разработана путем выполнения нескольких исследований после того, как будут выполнены исправления модели гидроциклона. Со временем, стратегия будет проверена на фабрике.

Критерий производительности	Расчетное	Измеренное
Скорость питания (т/ч)	360	360
Скорость разгрузки шаровой мельницы (т/ч)	1,228	1,239
Давление в гидроциклонах (Psi)	20.2	20
Скорость питания мелкого грохочения (г/м)	1,363	1,351
<b>Магнитный концентрат</b>		
Размер с 80% прохождения (d80) (мкм)	44	45
Содержание магнитного железа (%)	65.0	65.3
Извлечение (%)	96.0	95.2

Таблица 5. Сравнение расчетных и измеренных производительностей схемы после внедрения модификаций на фабрике.

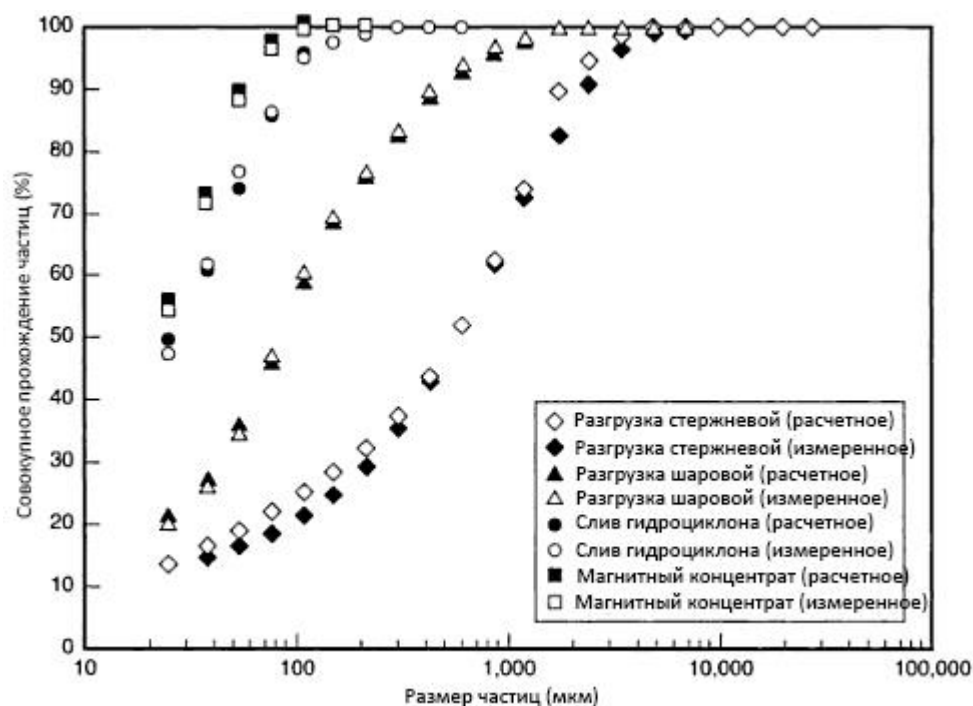


Рисунок 6. Расчетные и измеренные гранулометрические распределения ключевых потоков после полного выполнения модификации по снижению размера шаров до 1,5 дюймов.

## Заключение

Математическое моделирование было успешно использовано для повышения производительности на фабрике Minorca. Для оценки возможных преимуществ от внедрения гипотез оптимизации схемы, было выполнено большое количество расчетов. В процессе работы было установлено что замена текущих двухдюймовых шаров на полторадюймовые приведет к более эффективному измельчению и увеличит производительность фабрики на 10%. Эта возможность показалась наиболее реалистичной, в том числе в связи с легкостью реализации. В качестве следующего шага оптимизации ожидается замена действующих гидроциклонов на более объемные. В результате внедрения на заводе модификаций, полученных и проверенных с помощью математического моделирования, было достигнуто увеличение производительности на 10%. Другие идеи оптимизации в настоящий момент проверяются.