

Мельницы доизмельчения: проблемы масштабирования

Майкл Ларсон¹, Грег Андерсон¹, д-р Роб Моррисон², Майкл Янг¹

1- Xstrata Technology

2- Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre

Автореферат

По мере того как руды становятся более мелкозернистыми, растет потребность в доизмельчении перед обогащением или выщелачиванием. Несмотря на это, не существует стандартной методики расчета расхода энергии на измельчение ниже 70 микрон. Стандартный тест Бонда применим к крупному измельчению в шаровой мельнице, но не подходит для измельчения до 70 микрон с перемешиванием тонкой мелющей среды. В отсутствие стандартной методики, энергопотребление нередко определяется на основании расчетов поставщика или по аналогии с другими применениями. Однако поставщики используют самые разнообразные методы масштабирования, что влечет большой разброс в результатах расчета энергопотребления. Даже для похожих мельниц расчеты могут расходиться на 100-300%. Это неизбежно приводит к серьезным ошибкам, т.е. установке мельницы сильно завышенной или сильно заниженной мощности. В данной статье эта проблема рассматривается путем сопоставления фактической производительности промышленных мельниц доизмельчения с их первоначальными проектными расчетами. Анализ подтверждает, что серьезные просчеты в масштабировании действительно допускаются, а затем тиражируются при выборе мощности "по аналогии".

Рассмотрены условия проведения испытаний, позволяющие получить точную оценку мощности мельницы. Обязательными являются следующие условия испытания: тестирование в непрерывном режиме (не серии тестов), обеспечение установившегося режима (в мельнице не должно оставаться крупной фракции), внесение поправки на классификацию, непосредственное (а не опосредованное) измерение расхода энергии, применение среды такой же крупности, как и в промышленной установке. Несоблюдение даже одного из этих условий может повлечь погрешность до 40%, а несоблюдение нескольких условий увеличивает погрешность в несколько раз.

Введение

Потребность в применении мельниц доизмельчения растет по мере перехода на более сложные и мелкозернистые руды. Однако точные методики для проектного расчета измельчения пока отсутствуют. Стандартной отраслевой методики испытаний измельчения с перемешиванием не существует. Тест Бонда и другие испытания для решения задач масштабирования, рассчитанные на более грубый помол, не применимы к измельчению с перемешиванием тонкой мелющей среды до крупностей менее 70 микрон. Использование предназначенных для более грубого помола методик применительно к более тонкому доизмельчению влечет занижение расчетного расхода энергии вследствие разницы в размере шаров, в траекториях и во взаимодействии между частицами руды и шарами и между шарами и корпусом в небольших мельницах. Видоизмененные тесты, основанные на тесте Бонда, такие как тест Левина, более точны, но нередко требуют слишком больших затрат времени и слишком большого объема пробы. В результате поставщики мельниц доизмельчения разработали собственные методики масштабирования. Однако последний опыт показывает, что такие методики приводят к расхождению 300-400% в результатах расчетов затрат энергии на одинаковые задачи. В ряде случаев расчеты для одной и той же мельницы, выполненные разными производителями, отличались более чем на 100%. Очевидно, что такая ситуация не является приемлемой. Проектировщикам необходима стандартная методика правильного расчета энергозатрат и точные данные о фактических эксплуатационных (а не проектных) показателях для выполнения сопоставительного анализа. Без такой стандартной методики велико искушение выбрать наименьшее значение энергопотребления, основанное, например, на аналогии с другими проектами, а не на эксплуатационных показателях. Такой подход приведет к бесконечному воспроизведению неправильных решений и к провалу проектов.

В настоящем исследовании фактические характеристики доизмельчения сопоставляются с проектными показателями. Неудачный опыт проектирования объясняется недостатками

лабораторных методик. Рассмотрены разные методики и их интерпретации, а также описаны условия точного масштабирования любых технологий доизмельчения.

Методика масштабирования для IsaMill™

Компания MIM спроектировала IsaMill™ в начале 1990-х годов вследствие потребности в тонком измельчении руды из разрабатываемых ею рудных тел. Поскольку инженеры MIM одновременно занимались эксплуатацией, им требовалось точное масштабирование. Кроме того, они имели возможность скорректировать расчеты с использованием эксплуатационных показателей мельниц. В результате они разработали методики точного масштабирования 1:1 от лабораторной до промышленной установки, используя мельницы IsaMill мощностью 1,1 МВт и объемом 3 000 л (M3000) на рудниках Джордж Фишер (MIM) и MRM (рис. 1). При использовании этой методики IsaMill™ M4 (4 л, горизонтальная) работает в многопроходном режиме, при котором продукт одного непрерывного прохода становится питанием для следующего прохода, с получением характерного графика энергопотребления в зависимости от крупности продукта. Мельница заполняется на 80% мелющей средой той же крупности, что и в промышленном применении (как правило, 1-3 мм), и запускается на скорости 1500 об/мин. Конструкция и режим работы мельницы - диски, скорость вращения, крупность среды, тип среды и наполнение, а также сепаратор на выходе - очень близки к промышленной мельнице. Поэтому поступающие частицы исходного материала попадают в такие же условия измельчения и классификации, что и в промышленной установке. Поскольку объем мелющей среды относительно размера испытательной установки невелик, эффект корпуса мельницы незначителен, что подтверждается масштабированием в соотношении 1:1.

Масштабирование M3000 на MIM и MRM

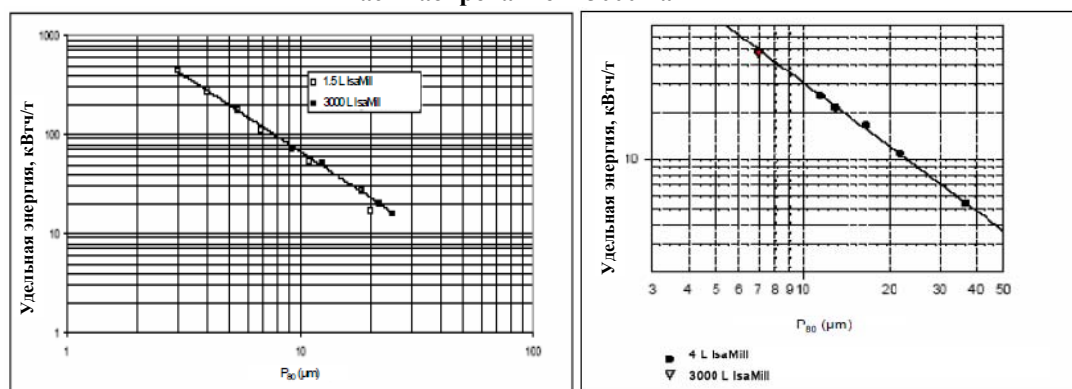


Рисунок 1. Масштабирование IsaMill M3000 на MIM (слева) и MRM (Barns K, Curry D; 2006)

Причины точного прямого масштабирования лабораторной установки IsaMills до промышленной следующие:

- Используется мелющая среда такой же крупности и такого же типа, что и в промышленной установке, - поправочного коэффициента не требуется.
- Конструкция и механизм мельницы одинаковы - горизонтальная мельница, аналогичные диски измельчения с близкой окружной скоростью, встроенный сепаратором, аналогичный промышленному. Таким образом, механизмы, скорости и физические процессы в лабораторной мельнице максимально приближены к промышленной мельнице.
- Лабораторная мельница имеет большие размеры относительно частиц материала и мелющей среды, поэтому «эффект корпуса» незначителен (расстояние между корпусом и дисками измельчения является достаточным).
- Испытания проводятся при такой же крупности и плотности подаваемой пульпы.
- Перерабатывается достаточное количество питания, чтобы установка вышла на устойчивый режим. Каждая точка характерного графика является результатом одного непрерывного прохода материала через мельницу, при котором мельница выходит на устойчивый режим. Содержимое мельницы должно замещаться несколько раз за проход, так как при

сохранении даже небольшого количества крупных частиц расчетные энергозатраты промышленной установки в устойчивом режиме оказываются существенно занижены. Это принципиально важно, и этого невозможно добиться при проведении серии тестов, потому что не происходит непрерывного поступления нового материала и выйти на устойчивый режим невозможно. Требование об устойчивом режиме является обязательным при тонком измельчении; к счастью, его можно выполнить при относительно небольших объемах проб (15 кг).

- Измерение потребляемой энергии непосредственно на валу агитатора, т.е. так, как это делается на промышленных мельницах. Это также позволяет точно вычислить мощность холостого хода, которая необходима для масштабирования лабораторной мельницы до установки любого размера.

Эта методика, разработанная для предприятий ММ, в настоящее время успешно применяется и на других установках. На рис. 2 показана характеристика масштабирования мельницы IsaMill M10000 (2,6 МВт / 3500 л.с.) компании Anglo Platinum.

Модель IsaMill	Установленная мощность, кВт	Объем камеры, л	Удельная энергия, кВт-ч/т	Содержание твердого в пульпе, %	P98, мкм	P80, мкм
M4	4	3,5	37	39	47,5	16,0
M10000	2600	10000	37	42	42,5	16,5

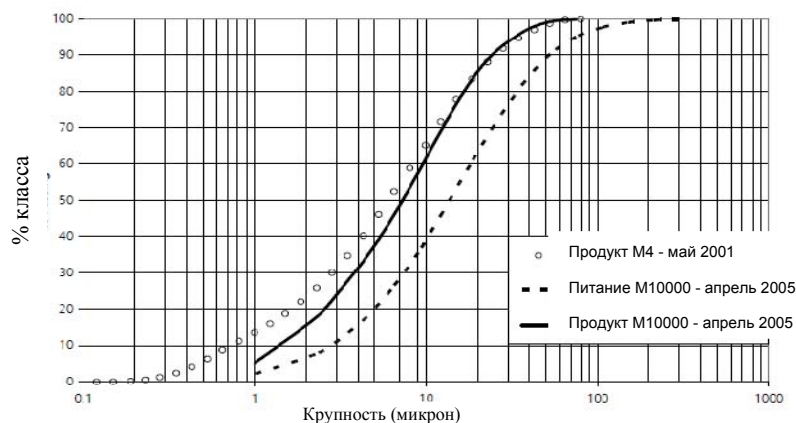


Рисунок 2. Масштабирование M10000, Вестерн Лим (Curry D, Clark L, Rule C; 2005)

Масштабирование SMD

Известны результаты масштабирования мельниц с перемешиванием мелющей среды SMD на руднике Сенчери. (Gao M, Reemeyer L, Obeng D, Holmes R; 2007). На руднике Сенчери они применяются для доизмельчения свинцово-цинковой руды, что очень близко к применению на рудниках Джордж Фишер и MRM. Тем не менее, по результатам масштабирования лабораторной мельницы 0,55 кВт до промышленной установки 355 кВт на Сенчери сообщается о погрешности 20%, т.е. промышленная установка оказалась менее эффективной, чем можно было ожидать на основании результатов испытаний. Это может быть связано с тем, что в лабораторных условиях передаваемая мощность измерялась через реактивный момент в камере измельчения, а не непосредственно (Nesset J, Radziszewski P, Hardie C, Leroux D; 2006); хотя на это была сделана поправка, тем не менее, погрешность 20% при масштабировании лабораторной мельницы 0,55 кВт

до промышленной установки 355 кВт сохранилась. Это может быть связано с тем, что мельница не вышла на устойчивый режим работы.

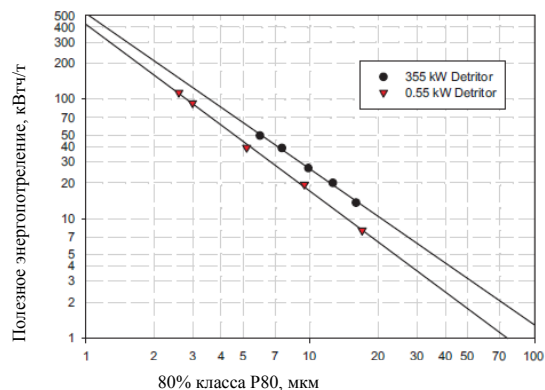


Рисунок 3. Масштабирование мельницы с перемешиванием мелющей среды SMD на руднике Сенчери (Gao et al, 2007)

Методика масштабирования, разработанная для IsaMill, была затем применена к промышленной установке SMD на руднике Сенчери. Методика IsaMill M4 позволила точно предсказать показатели промышленной установки на руднике Сенчери при P_{80} . Это интуитивно верно: хотя мельницы имеют разную конструкцию (горизонтальная и вертикальная), в них используется одинаковая среда при похожих скоростях, поэтому можно ожидать близких характеристик энергопотребления при измельчении. Единственное различие между испытаниями заключалось в меньшей крупности при P_{98} (более крутое распределение по крупности) в IsaMill, что связано с наличием встроенного сепаратора и проблемами проскальзывания в промышленной установке SMD.

Промышленная установка SMD и лабораторная IsaMill

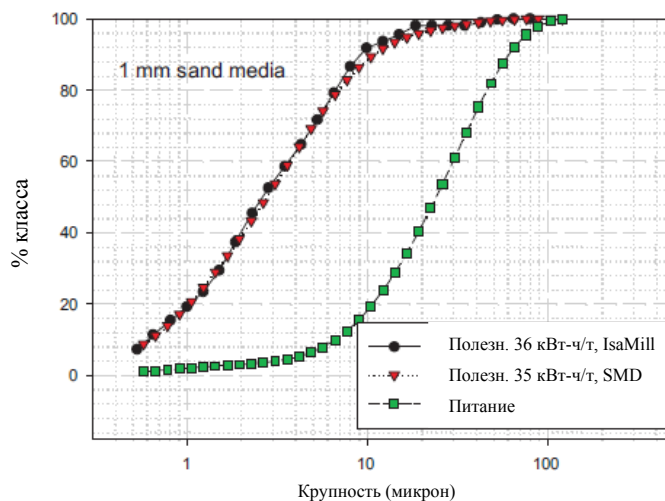


Рисунок 4. Сравнение характеристик промышленной установки SMD и IsaMill 4 л (Gao et al, 2007)

Погрешности вследствие недостаточного измельчения крупных частиц

Тестирование в непрерывном режиме, имитирующее измельчение в промышленной установке, должно обеспечивать точное масштабирование. Однако необходимо следить за тем, чтобы крупные

частицы не скапливались в мельнице и чтобы они достаточно разламывались в ходе тестирования. Почему следует избегать накопления материала, будет рассмотрено ниже; использование слишком малой пробы для выхода на устойчивый режим приведет к занижению энергопотребления. В то же время, неизмельчение наиболее крупных частиц может повлечь завышение энергопотребления. Если мелющая среда имеет слишком малую крупность для размола наиболее крупных частиц, они скапливаются в мельнице и оттесняют мелющую среду. Это влечет к падению эффективности измельчения и повышению передаваемой мощности (аналогично накоплению "класса критической крупности" в мельнице полусамоизмельчения). Снижение эффективности измельчения не всегда очевидно, если частицы остаются внутри мельницы.

Можно с уверенностью утверждать, что это стало причиной схожих результатов, о которых сообщается в (Farber et al.). В этой работе сравниваются два вида среды, А и В. Более мелкая среда представлена как более эффективная, однако результаты неверны вследствие накопления крупного материала в мельнице. Если учесть крупный материал, фактическое энергопотребление намного выше. В первом графике на рис. 5 показано меньшее трение среды типа В, влекущее меньшую передаваемую мощность в воде. Естественно, что в любой среде на перемешивание менее крупных частиц нужно затратить меньше энергии, чем на перемешивание более крупных. (Легче засунуть руку в ведро, наполненное шариками диаметром 3 мм, чем в ведро, наполненное шариками 12 мм). Этого же можно ожидать при работе на пульпе, однако второй график на рис. 5 показывает обратное: в средах обоих видов расходуется больше энергии на измельчение руды с использованием мелкой среды (платиновая руда UG2). Можно с уверенностью утверждать, что это указывает на ошибочность испытаний: мелкая среда (1,7 мм тип В и 2 мм тип А) была слишком мелкой, чтобы измельчить крупные частицы, вследствие чего эффективность измельчения снизилась и в мельнице стали накапливаться крупные частицы. Поэтому построенные характерные графики (рис. 6) неверны.

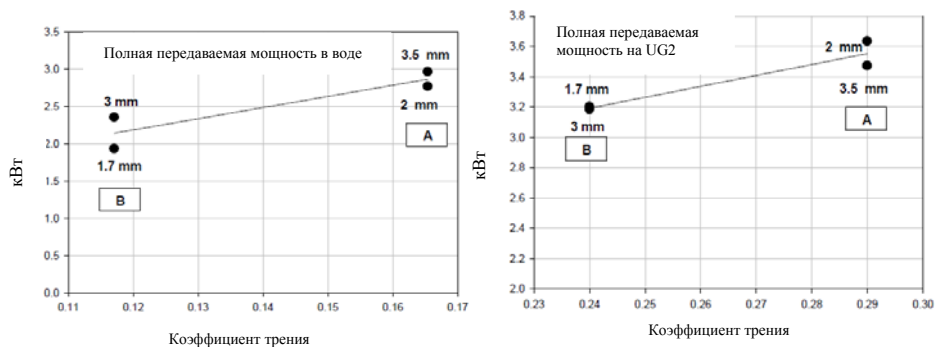


Рисунок 5. Передаваемая мощность в воде (слева) и пульпе UG2 (справа) при первом проходе тестирования с целью построения характерного графика (Farber et al; 2010)

Характерный график М4 с накоплением крупного класса

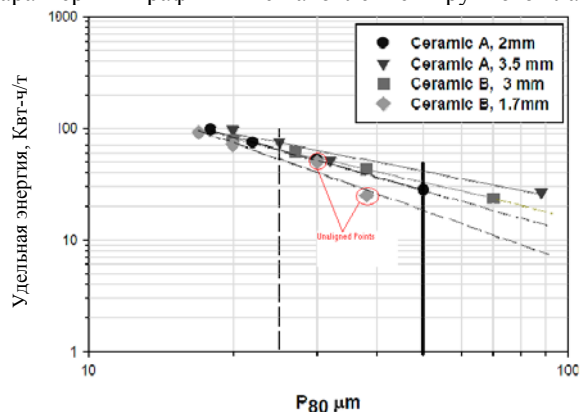


Рисунок 6. Характерный график для UG2 при мелющих средах разной крупности и удельной плотности (Farber et al, 2010)

И действительно, на рис. 6 виден признак, указывающий на ошибку: первая точка на линии "1,7 мм керамика В" не совпадает с линией, проведенной через три другие точки, - крупность меньше ожидаемой. Это служит прямым указанием на накопление крупных частиц в мельнице при первом проходе, на недостижение устойчивого режима, а следовательно, и на ошибочность результатов испытания. Необходимо отметить, что отклонение этой точки не представляется значительным на двойной логарифмической шкале мелкого масштаба, использованной на рис. 6. Однако это отклонение становится намного более заметным, если построить тот же график в более крупном масштабе (10-100 кВт/т вместо 1-1000 кВт/т). Поэтому нужно быть очень внимательным при использовании двойной логарифмической шкалы при тонком помоле.

Аналогичные исследования, но с обеспечением измельчения крупных частиц и выхода на устойчивый режим работы, были проведены Ларсоном. Были сопоставлены разные крупности и виды сред в воде и при измельчении медной руды. Это принесло ожидаемые результаты: мелкие среды более эффективны, потребляют меньше энергии как в воде (рис. 7), так и в медной руде (рис. 8), если они способны измельчить наиболее крупные частицы.

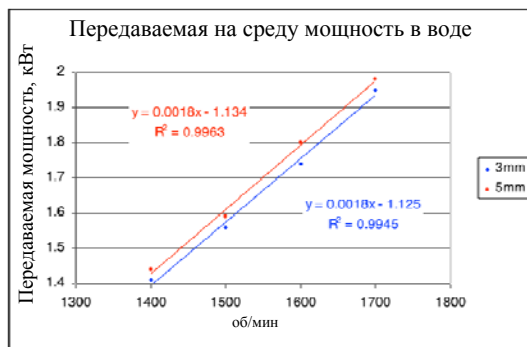


Рисунок 7. Крупность среды Hira и полная передаваемая мощность в воде (Larson M; 2010)

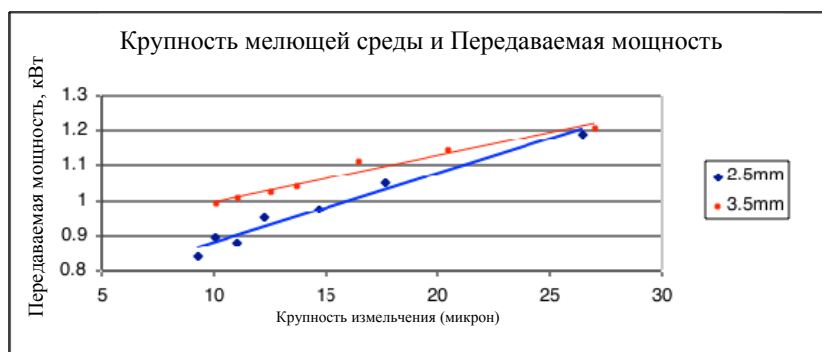


Рисунок 8. Крупность среды и передаваемая мощность на медном концентрате (Larson M; 2010)

На рис. 9 показана разница между полезной передаваемой мощностью при аналогичной среде, но при разной крупности помола. Данные получены в ходе отдельных испытаний для построения характерных графиков для одной и той же руды в одинаковых условиях. Обе среды были способны измельчить верхний класс крупности. При использовании среды 5 мм отношение P_{98}/P_{80} немного меньше: 2,6 против 2,7 при среде 3 мм.

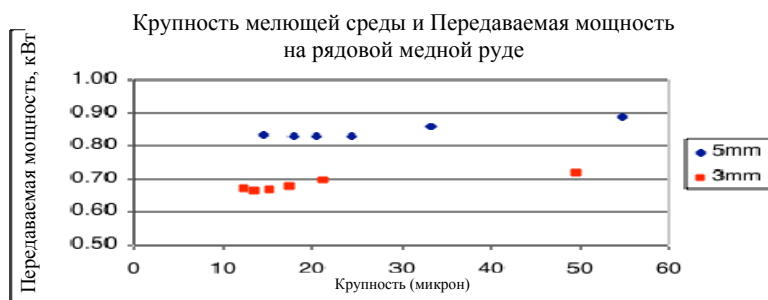


Рисунок 9. Крупность среды Нiга и Передаваемая мощность на медной рядовой руде (He M; 2010)

Как показано в табл. 1 и на рис. 8 и 9, менее крупная среда МТ1 уменьшает передаваемую мощность при одинаковых условиях пульпы. Более того, по мере измельчения пульпы передаваемая мощность уменьшается. На рис. 8 первые точки, соответствующие 1,2 кВт, имеют почти одинаковую передаваемую мощность. В этих точках среда 2,5 мм позволяет получить $P_{98} = 95$ мкм, а среда 3,5 мм - $P_{98} = 63$ мкм. Точки с меньшей крупностью имеют меньшие отношения, поскольку среда 2,5 мм более способна измельчить верхний класс в данных проходах.

Полезная мощность мельницы при разных крупностях среды МТ1			
Крупность среды	1,5 мм	2,5 мм	3,5 мм
Полезная мощность	0,80 кВт	0,98 кВт	1,07 кВт

Таблица 1. Средняя полезная передаваемая мощность мельницы при измельчении медного концентрата при разных крупностях среды (Larson M; 2010)

Масштабирование M10000 на руднике Моренчи

Конструкция мельницы M10000 на руднике Моренчи описана ниже и в таблице 3. Хотя испытание с использованием M4 IsaMill точно предсказало энергопотребление для достижения требуемого P_{80} , были выявлены и другие важные факторы, необходимые для точного прогнозирования P_{98} и рассмотренные ниже (Cole J, Wilmot J; 2009).

В проекте было заложено $P_{80} = 7$ микрон и $P_{98} = 15$ микрон. Фактическая крупность исходного материала составляла $P_{80} = 11$ микрон и $P_{98} = 34$ микрон при переработке концентратов Моренчи. Концентраты Моренчи имели изменчивое содержание пирита, который хуже поддается измельчению, чем относительно чистый халькопирит. Учитывая минералогический состав концентратов Сьеррита, содержащих примерно 85% халькопирита, было решено перейти на переработку концентратов Сьеррита. Эти концентраты имели более постоянный состав и были менее твердыми по сравнению с концентратами Моренчи. Концентраты Сьеррита также близки к концентратам Багдад, которые были использованы для расчета установки IsaMill. P_{80} и P_{98} у концентратов Сьеррита были тоньше, чем у концентратов Моренчи (7,4 микрон и 25 микрон, соответственно), но все же не соответствовали проектным характеристикам. Проектное содержание пирита в концентрате составляло 22,5%, фактическое же содержание в концентратах Моренчи имело разброс от 10-15% вплоть до 55%.

Критерии проектирования комплекса выщелачивания Morenci MT-DEW-SX	
Критерии проектирования	
Производительность, мт/ч	26.4
Сверхтонкий помол	
Производительность, м т/ч	32.0
P_{80} , мкм	7.0
P_{98} , мкм	15.0
кВт-ч/т	68.0

Таблица 2. Критерии проектирования M10000 на руднике Моренчи (Cole J, Wilmot J; 2009)

Даже при разном минералогическом составе руд, невозможность достижения проектного отношения P_{98}/P_{80} , основанного на первоначальных испытаниях, указывает на то, что крупные твердые частицы не перемалывались полностью и задерживались в испытательной установке. Хотя на данный момент это единственный случай, в котором P_{80} масштабируется, а P_{98} - нет, это означает, что если цель испытаний заключается в точном прогнозировании P_{98} , стандартной пробы 15 кг может быть недостаточно для мельницы M4.

На руднике Кумтор компании Centerra Gold имеется аналогичное применение с использованием мельницы M10000 IsaMill для измельчения золотопиритного сырья крупностью 20 мкм до $P_{80} = 10$ мкм перед цианидным выщелачиванием. На рис. 10 показано, что это масштабирование было выполнено успешно, включая расчет P_{98} (в действительности промышленная мельница позволяет получать гранулометрический состав, который немного лучше расчетного).

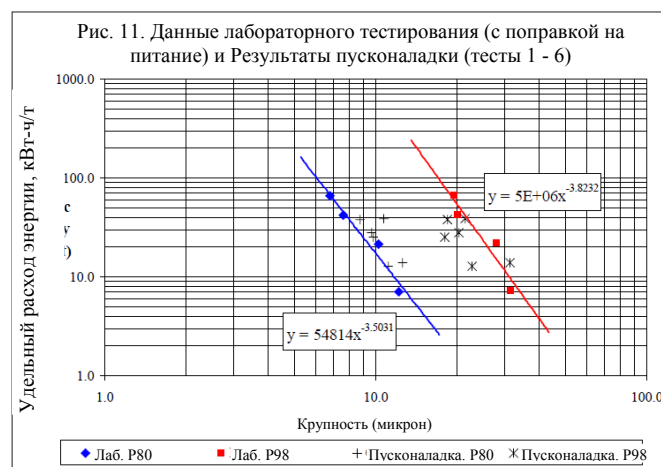


Рисунок 10. Масштабирование M10000 на руднике Кумтор (Kazakoff J, Mortimore A, Smith S, Curry D; 06)

Методики для башенных мельниц

Условия проведения тестирования башенной мельницы Nippon Eirich показаны на рис. 11. Эти методики вызывают ряд вопросов при сопоставлении с описанными выше принципами. Во-первых, рециркуляция разгрузки мельницы непосредственно на насос питания мельницы означает, что устойчивый режим никогда не будет достигнут, - питание мельницы смешивается с мелкой фракцией от первого прохода (напротив, в тестировании на M4 IsaMill проба непрерывно подается из емкости питания, проходит через мельницу и поступает в отдельную емкость продукта, воспроизводя таким образом процесс полномасштабное измельчение).



Grindability test 易磨性实验



Модель: башенная мельница NE008
Емкость: 8 л
Проба: ~ 10 кг / тест
Длительность тестирования: 1 неделя
Цель: предварительная проверка измельчаемости



Модель: башенная мельница KM-5
Емкость: 120 л
Проба: примерно 150 кг / тест
Длительность тестирования: 2 недели
Цель: расчет размера мельницы для технологической гарантии

Рисунок 11. Брошюра Nippon Eirich, март 2009 года

Во-вторых, в этих тестах, скорее всего, используется проба слишком малого объема относительно размера лабораторной мельницы. Внутренний объем мельницы должен замещаться не менее 3-4 раз, чтобы установка вышла на устойчивый режим и чтобы предотвратить накопление крупных частиц (что влечет значительное занижение энергопотребления). В таблице 3 показано, что в данном испытании башенной мельницы используется примерно лишь половина от объема материала, необходимого для достижения устойчивого режима.

Питание для тестирования и свободной объем мельницы в зависимости от типа

Тип мельницы	Объем мельницы (л)	Объем твердой фазы (л)	Отношение (рекомендуется не ниже 3)
M4 IsaMill	1.35	5.0	3.70
Башенная мельница NE008	2.35	3.33	1.42
Башенная мельница KM-5	35.2	50.0	1.42
Удельная плотность твердой фазы 3,0, коэффициент заполнения средой 0,66, рабочий объем мельницы (по геометрии) 0,88			

Таблица 3. Сравнение соотношения твердой фазы и свободного объема мельницы при тестировании на измельчение

Последствия слишком малого объема подаваемого материала показаны на рис. 12 (по результатам тестирования пилотной башенной мельницы). Характерная кривая существенно отличается при 50 л материала (0,7 свободного объема мельницы) и 150 л материала (2 свободных объема мельницы). Очевидно, что при небольшом объеме пробы мельница не находится в устойчивом режиме. В данном случае расчет энергии, необходимой для измельчения до $P_{80} = 70$ мкм, увеличивается на 30% при большем объеме материала. На самом же деле, объем материала должен быть еще больше, т.е. действительная погрешность еще выше.

Слишком малый объем материала в сочетании с разбавлением нового поступающего материала продуктом измельчения увеличивают погрешность еще более и могут повлечь значительное занижение расчетного энергопотребления.

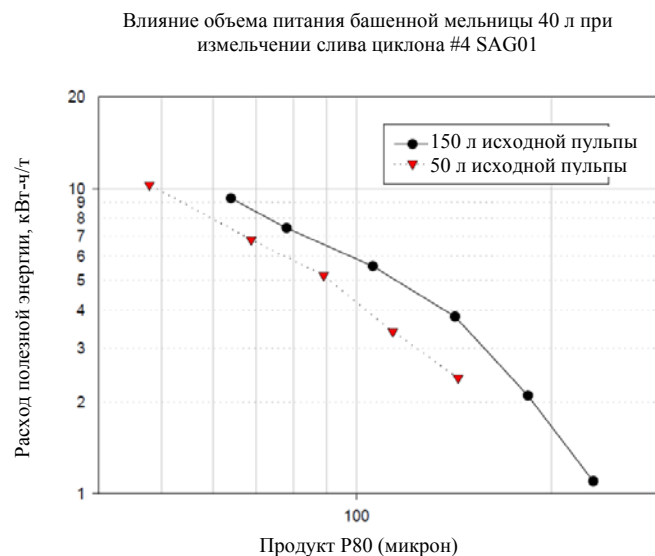


Рисунок 12. Влияние изменения объема поступающей в пилотную башенную мельницу твердой фазы (Gao M)

Были проведены расширенные тестирования, чтобы исключить эту погрешность при стандартных испытаниях на мельнице IsaMill M4 с пробой 15 кг. Ниже в качестве примера приведено сравнение характерных графиков для проб стандартного железного концентрата весом 15 и 35 кг. В обоих испытаниях магнетитовый концентрат ($F_{80} = 65$ микроны) измельчался в среде 2,5 мм. Среда крупностью 3,5 мм была выбрана исходя из соображений энергоэффективности и лучшего измельчения верхнего класса по сравнению со средами меньшей крупности. Полученная крутая кривая распределения по классам крупности свидетельствует о повышении содержания в конечном концентрате на 2-3% в зависимости от требуемого помола. Кривые P_{80} и P_{98} находятся в пределах погрешности, допустимой для испытания на M4. Железная руда имела удельную плотность твердой фазы 4,2. Этот показатель немного выше обычного. Руда меньшей удельной плотности займет больший объем, поэтому выводы из данного испытания применимы и к таким пробам.

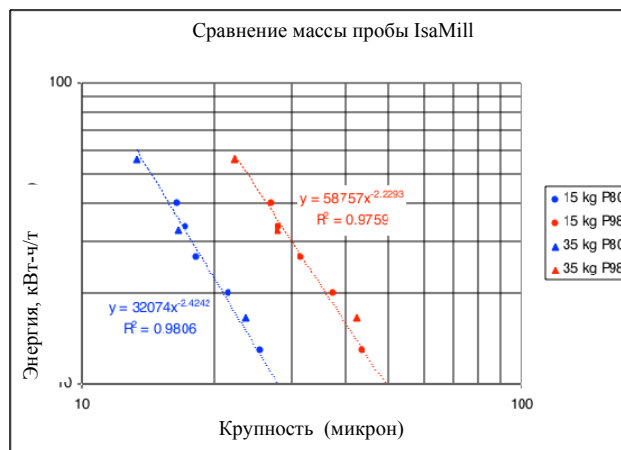


Рисунок 13. Влияние изменения веса материала на характерную кривую в мельнице M4 IsaMill (Larson M, Villadolid V; 2010)

В этих двух тестированиях $P_{80} = 16,5$ и $16,7$ мкм соответствует энергопотребление немного выше 40 кВт-ч/т. Две кривые распределения по классам крупности сравниваются на графике ниже. Их форма почти идентична. Это также означает, что при обеих массах пробы мельница работает в устойчивом режиме и производит продукт без эффекта сегрегации.

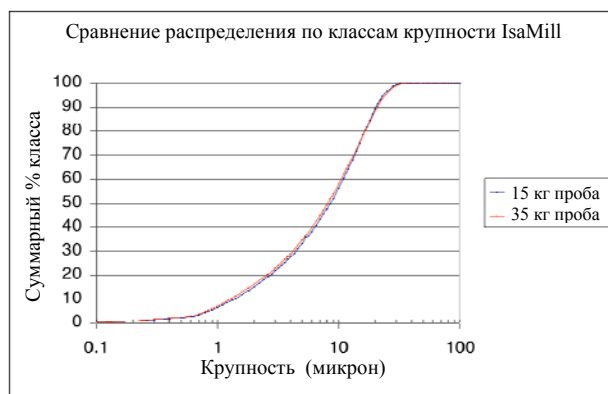


Рисунок 14. Влияние массы питания на гранулометрический состав продукта M4 IsaMill (Larson M, Villadolid V; 2010)

Сравнительный анализ доизмельчения (Nesset et al.)

В работе 2006 года Nesset и другие сравнивают эффективность измельчения в шаровой мельнице, IsaMill, SMD и Vertimill. Авторы приходят к выводу, что методика измерения мощности в SMD по реактивному моменту занижает энергопотребление на 32% и 39% в двух испытанных типах сред. Если мощность в SMD измеряется на двигателе, разница в энергопотреблении между IsaMill и SMD при P_{80} практически отсутствует, хотя при P_{98} разница есть. Это подтверждает выводы, сделанные выше. Однако в работе Nesset также сделан вывод, что лабораторная башенная мельница на 43% более эффективна, чем IsaMill и SMD, при использовании самой мелкой из сред, испытанных в башенной мельнице. Поскольку IsaMill и SMD проектировались как более эффективные в сравнении с башенными мельницами при тонком помоле и это было неоднократно подтверждено промышленной эксплуатацией, данный вывод требует проверки. Он указывает на еще один возможный источник погрешности в лабораторных испытаниях - использование среды с крупностью, отличной от промышленной установки.

Крупность среды имеет важнейшее значение для эффективности измельчения - потребность в использовании более мелких сред для повышения энергоэффективности стала причиной разработки как IsaMill, так и SMD. В испытаниях башенных мельниц в работе (Nesset et al.) использовалась среда 5 мм, которая никогда не используется в промышленной эксплуатации, а более крупные

среды, которые также были испытаны в башенной мельнице, показали намного более низкую энергоэффективность. Самая мелкая из сред, промышленно используемых в башенных мельницах, - это 12 мм (в противном случае мелющая среда выносятся из мельницы). В пересчете на кубический метр среда 5 мм имеет в 2,4 раза большую площадь поверхности по сравнению со средой 12 мм - это огромная разница для измельчения истиранием в башенной мельнице. Наиболее эффективные крупности среды для разных установок согласно Nasset et al. показаны в таблице 4. Хотя среда 5 мм наиболее эффективна в шаровой и башенной мельницах, ключевой момент состоит в том, что ее невозможно использовать в полномасштабных установках из соображений удержания среды и энергоемкости (размер установки). Именно поэтому были разработаны высокоскоростные мельницы с перемешиванием мелющей среды (IsaMill и SMD) - чтобы на практике использовать преимущества энергоэффективности, связанные с мелкими мелющими средами.

Эффективная крупность среды

Технология	Тип мелющей среды	Крупность среды (мм)
IsaMill	Керамические шары	2,2
SMD	Керамические шары	2,2
VertiMill	Стальная дробь	5
Лабораторная шаровая мельница	Стальная дробь	5
Мельница доизмельчения цинка Brunswick	Мелкая дробь, сталь	16

Таблица 4. Наиболее эффективные крупности среды (Nasset et al; 2006)

Даже неподходящая крупность среды не объясняет полностью необычайную эффективность башенной мельницы, о которой сообщается в статье Nasset. Вероятно, что тестирование башенной мельницы также не смогли выйти на устойчивый режим и в мельнице накапливались крупные частицы. Подтверждающие пилотные данные отсутствуют, но исходя из сведений о размере пробы и количестве испытаний, можно заключить, что объем материала, подаваемого в башенную мельницу, превышал объем мельницы всего в 1,5 раза, а этого недостаточно для выхода на устойчивый режим. Это предположение основано на графике (рис. 15 ниже) гранулометрического состава продукта при трех разных крупностях среды. График показывает, что среда 5 мм улучшила показатели P_{80} и P_{98} относительно более крупных сред. Это неожиданный результат: как правило, крупная среда измельчает крупные частицы более эффективно (особенно в мельнице с перемешиванием мелющей среды). Такой результат, противоречащий интуитивным ожиданиям, убедительно свидетельствует о том, что крупные частицы накапливались в башенной мельнице во время испытания, что повлекло значительное занижение энергопотребления (см. выше).

Влияние мелющей среды в Vertimill на распределение по классам крупности

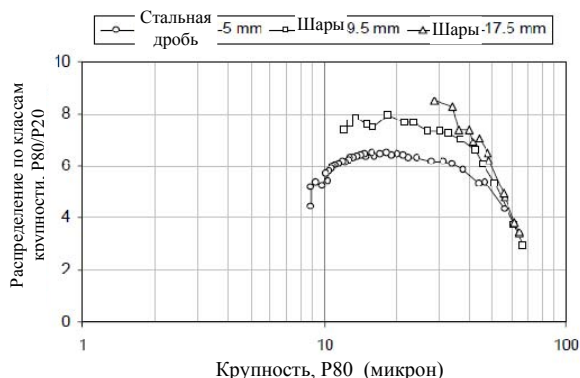


Рисунок 15. Гранулометрический состав продукта и крупность мелющей среды в Vertimill (Nasset et al; 2006)

Сравнительный анализ проектных и эксплуатационных показателей башенных мельниц

В таблице 5 сравниваются некоторые проектные и фактические показатели башенных мельниц. При составлении таблицы были использованы общедоступные источники информации (референц-лист поставщиков), проекты AMIRA P336/P9 и собственные эксплуатационные данные Xstrata.

Проектные и эксплуатационные показатели башенных мельниц			
Применение	Энергопотребление для требуемой крупности продукта		Проектные/фактические показатели
	Проектный расчет поставщика	Факт*	
Доизмельчение Cu	6 кВт-ч/т при 45 мкм	13 кВт-ч/т при 45 мкм	48%
II измельчение Pb	4,4 кВт-ч/т при 63 мкм	7,9 кВт-ч/т при 63 мкм	57%
III измельчение Pb	7,1 кВт-ч/т при 45 мкм	12 кВт-ч/т при 45 мкм	63%
Доизмельчение Zn	5,7 кВт-ч/т при 30 мкм	9,4 кВт-ч/т при 30 мкм	61%
Доизмельчение Zn	19,4 кВт-ч/т при 20 мкм	25,5 кВт-ч/т при 20 мкм	76%
Доизмельчение Pb	16,7 кВт-ч/т при 20 мкм	31 кВт-ч/т при 20 мкм	54%
Доизмельчение Ni	11,7 кВт-ч/т при 60 мкм	13,5 кВт-ч/т при 60 мкм	84%
Доизмельчение Fe	9,4 кВт-ч/т при 30 мкм	13,8 кВт-ч/т при 30 мкм	68%

* Фактическое энергопотребление было рассчитано с использованием эксплуатационного рабочего индекса по результатам исследований на фабриках

Таблица 5. Проектные и фактические показатели башенных мельниц

Эксплуатационный индекс был также рассчитан на основании всех имеющихся данных о промышленных мельницах и представлен на рис. 16. Проектные показатели не представлены, но этот график наглядно показывает, на что мельницы в действительности способны. Недавние проектные расчеты доизмельчения, показанные в нижней части графика, значительно занижают фактические эксплуатационные показатели мельниц.

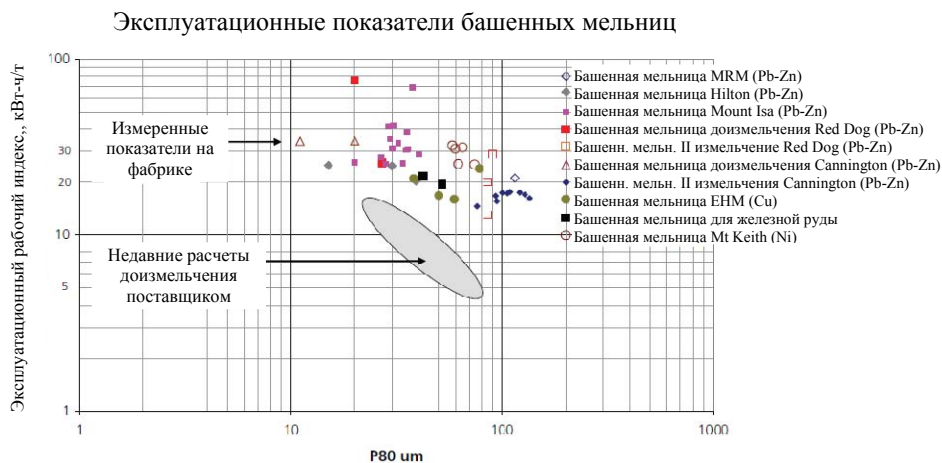


Рисунок 16. Обзор эксплуатационных рабочих индексов башенных мельниц (Pease J; 2010)

Видоизмененные тесты Бонда и Левина

Представляется, что тест Левина в недостаточной мере используется при расчете шаровых мельниц доизмельчения. Некоторые результаты представлены в таблице 6. Требование к весу пробы (20-30 кг) может являться препятствием к использованию. Тест Левина представляет собой видоизмененный тест на измельчение в шаровой мельнице Бонда: в первом используется меньший размер ячейки сит и более мелкий исходный материал. В тесте Левина лабораторная мельница

работает в течение разных промежутков времени (разное энергопотребление). После каждого промежутка содержимое мельницы полностью выгружается и просеивается с использованием номинала, соответствующего данному промежутку. Нижний продукт заменяется свежим верхним классом для поддержания постоянного объема. Эта процедура выполняется с 75, 53, 45 и 38 микрон. Поскольку проводится 4 теста, для каждого из которых необходимо примерно 2 л материала, потребность в материале может превышать максимальный возможный объем пилотной партии, тем более что последняя, как правило, представлена концентратом основной флотации. Тем не менее, если проба необходимой массы доступна, представляется, что этот тест дает наиболее точные результаты по сравнению с другими методиками.

Сравнительный анализ эксплуатационных данных и результатов тестов на измельчение

Материал и происхождение	кВт-ч/т	
	Фабрика	Тест на измельчаемость тонкого материала
Золотая руда, East Driefontein	14.4	14.8
Золотая руда, Libanon	10.8	11.3
Золотая руда, Western Deep Levels, pVCR Reef	14.7	13.8
Золотая руда, Western Deep Levels, Carbon Leader	17.6	16.4
Флуорит, Chemspar	4.3	3.3
Медно-свинцово-цинковая руда, Блэк Маунтин	12.8	11.1
Медно-цинковая руда, Приска	13.6	12.8
Песчаные хвосты, Crown Mines	9.3	9.3

Таблица 6. Результаты теста Левина и показатели промышленных шаровых мельниц (Levin J; 1989)

Условия эксплуатации

Результаты технологических испытаний на продукте определенной технологии не могут быть распространены на другую технологию измельчения. Каждая технология дает собственную кривую распределения по классам крупности при заданном значении P_{80} . Отношение P_{98} к P_{80} необходимо рассматривать в каждом случае отдельно.

Это имеет большое значение для извлечения при выщелачивании. Чем больше верхнего класса, тем ниже извлечение. Материалы, измельченные до требуемого значения P_{80} , могут различаться по содержанию частиц максимальной крупности в три раза. Это также влияет на содержание в конечном концентрате при флотации, поскольку невысвобожденные крупные частицы будут флотироваться, что может повлечь повышение содержания пустой породы в концентрате.

Распределение по классам крупности –
Экстракция выщелачиванием

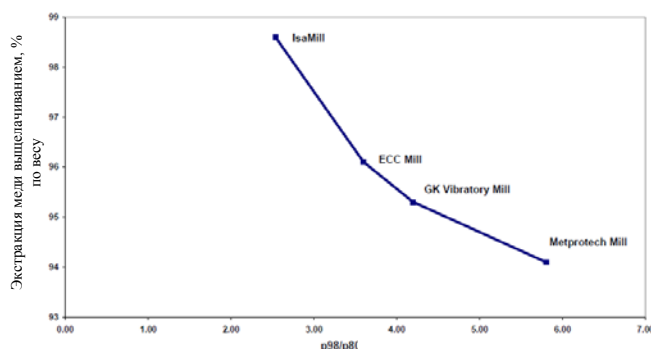


Рисунок 17. Влияние четкого распределения по классам крупности на извлечение при выщелачивании (Pease J, Young M, Curry D; 2007)

Кроме того, необходимо использовать правильную плотность при проведении тестирования для целей масштабирования. Эффект вязкости становится более выраженным по мере приближения к тонким классам, свойственным для доизмельчения. В определенный момент в зависимости от образованной площади поверхности пульпа начнет нести мелющую среду, вместо того чтобы перемешивать ее и измельчать. В настоящее время Xstrata Technology рекомендует использовать при тестировании воронку Марша для контроля плотности и оптимизации влияния вязкости на энергоэффективность. Воронка Марша представляет собой простую воронку, в которой измеряется время, необходимое для прохождения через нее одной кварты пульпы. Воронка Марша не заменяет комплексного исследования реологии, но является удобным средством измерения, идеальным для использования в лабораторных исследованиях или тестировании на площадке.

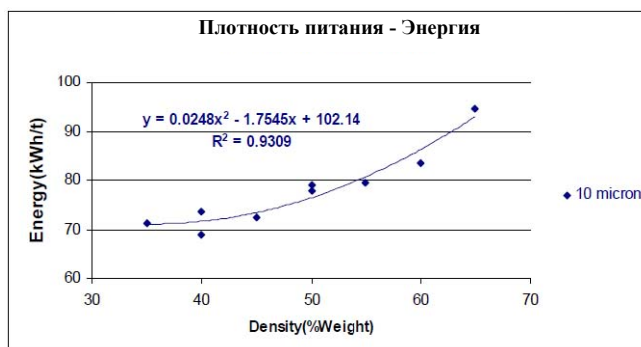


Рисунок 18. Влияние плотности питания на эффективность тонкого помола (Larson M, Morrison R, Young M; 2008)

Перспективы

Xstrata Technology также работает над совершенствованием масштабирования IsaMill посредством проведения спонсируемых и собственных исследований. Одна из последних разработок - это модель IsaMill JKSImMet. Эта модель основана на относительно простой функции, прогнозирующей образование мелких фракций. Стандартная характерная кривая имеет один недостаток, который заключается в том, что, как правило, кривая не проходит через точку, соответствующую подаче материала при нулевой энергии. Это ограничивает возможности использования характерной кривой в части прогнозирования энергопотребления в большем, нежели фактический, диапазоне крупностей. Кривую можно экстраполировать, но чтобы иметь уверенность в результатах всегда лучше охватить необходимый диапазон непосредственно самим тестированием.

Квадратичная функция получения тонкого класса также описывает линейное отношение, но всегда проходит через точку, соответствующую нулевой энергии. Эта модель является продолжением работы Макайвора (McIvor R and Finch J; 2007), показавшей, что новый продукт тоньше определенной требуемой крупности имеет характеристику, близкую к линейной, для шаровых и стержневых мельниц. Для IsaMill оказалось невозможным определить зависимость между процентной долей пропускаемого материала в каждом классе измельчения и расходом энергии. Однако было установлено, что если возвести класс измельчения в квадрат, можно провести прямую линию, соединяющую все точки, включая питание, как показано на рис. 19 применительно к разным медным рудам. Единственное ограничение состоит в том, что крупность должна быть измерима во всех пробах. Это, скорее всего, потребует введения фракции между F_{10} питания и P_{90} продукта.

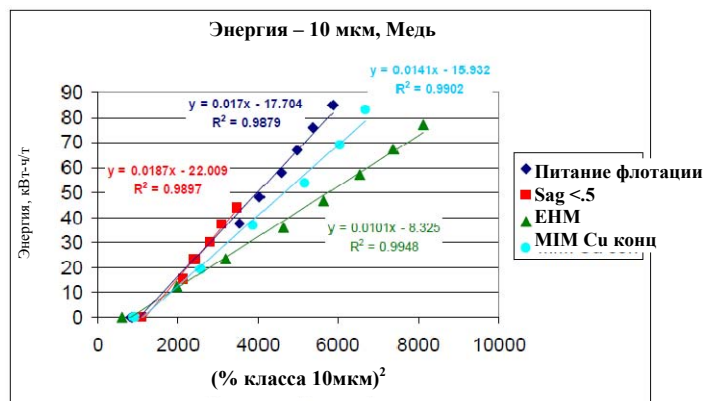


Рисунок 19. Квадратичная функция получения тонких классов применительно к различным медным рудам (Larson et al; 2008)

Этот метод также позволяет более правильно рассчитать типоразмер мельницы, если расчетная крупность питания меняется после тестирования. Сохраняя параллельность линии и изменяя крупность питания, можно определить новое значение энергопотребления. На рис. 19 характеристика показана как квадратичная функция. Новый более крупный исходный материал можно нанести, рассчитав новое квадратичное значение и проведя новую линию графика зависимости энергопотребления и крупности через такую точку слева от первоначальной линии. Сохраняя новую линию параллельной первоначальной, можно определить энергопотребление для требуемого продукта.

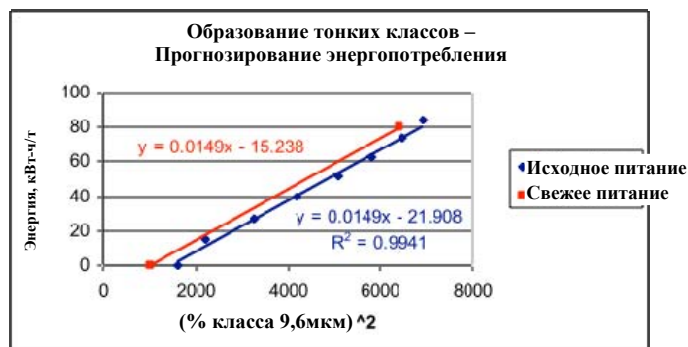


Рисунок 20. Квадратичная функция для прогнозирования энергопотребления при получении тонких классов из более крупного питания (Larson; 2010)

Скорее всего, квадратичная функция точно описывает процесс по той причине, что измельчение истиранием увеличивает площадь поверхности равномерным образом. В IsaMill частицы также становятся более округлыми. Поскольку это верно и для других технологий измельчения истиранием, существует большая вероятность того, что квадратичная функция или иная, похожая на нее функция применима и к этим процессам.

Заключение

В настоящее время для расчетов доизмельчения применяется целый ряд тестов, а прогнозируемые ими показатели энергопотребления имеют огромный разброс. Очевидно, что причиной являются серьезные ошибки, влекущие либо завышение, либо занижение установленной мощности и неоптимальные эксплуатационные показатели установок. Отрасль нуждается к общепринятой стандартной методике достоверного прогнозирования расхода энергии на доизмельчение. Для этого необходимо понять, как фактические эксплуатационные показатели доизмельчения соотносятся с расчетными. Экспертиза технологий тонкого помола JKMRС призвана дать ответ на этот вопрос. Перерабатывающим, проектным и инженерным компаниям

следует поддержать тщательное и независимое экспертное исследование с целью изучения эксплуатационных данных и разработки отраслевого стандарта.

Пока такой стандарт отсутствует, существующие методики масштабирования необходимо подвергнуть тщательной проверке, с тем, чтобы фактические показатели мельниц доизмельчения при полномасштабной эксплуатации не отличались от проектных. Инженерам следует детально проверять все расчеты, предоставляемые поставщиками, но не в сравнении с конструкциями других компаний, а на соответствие фактическим эксплуатационным показателям других внедренных установок.

Благодарность

Авторы выражают признательность Xstrata Technology и JKMRC за данные исследований, использованных в этой работе, и за помощь в ее написании.

Список использованной литературы

1. Barns K, Curry D; 2006; Stirring the Pot: A New Direction for IsaMilling; Ultrafine Grinding 06
2. Cole J, Wilmot J; 2009; MORENCI CONCENTRATE LEACH PLANT FIRST YEAR REVIEW; SME 2009 Annual Meeting; Denver USA
3. Curry D, Clark L, Rule C; 2005; Collaborative Technology Development-Design and Operation of the World's Largest Stirred Mill; Proceedings 2005 Randol Conference; Perth Australia
4. Farber B, Durant B, Bedesi N; 2010; Effect of Media Size and Mechanical Properties on Milling Efficiency and Media Consumption; Comminution 10; Cape Town, South Africa
5. Gao M, Reemeyer L, Obeng D, Holmes R; 2007; Efficiency of the Detritor Mills at Zinifex Century Mine; SAIMM
6. Gao M; CSIRO report
7. He M; 2010; JKMRC private report to Xstrata Technology
8. Kazakoff J, Mortimore A, Smith S, Curry D; 2006; Introduction of IsaMill Technology into a Major Gold Flotation and Leaching Operation in Central Asia; Comminution 06; Perth Australia.
9. Larson M; 2010; Development of a Simulation Model of an IsaMill; MPhil Thesis, University of Queensland JKMRC
10. Larson M, Morrison R, Young M; 2008; Improving Grinding Efficiency With The IsaMill; Comminution 08, Falmouth England
11. Larson M, Villadolid V, Xstrata Technology Internal Report-Iron Ore, May 2010
12. Levin J; 1989; Observations on the Bond standard grindability test, and a proposal for a standard grindability test for fine materials; SAIMM Journal, January 1989
13. McIvor R and Finch J; 2007; The Finch-McIvor Functional Performance Based Grinding Circuit Modeling System; SME Annual Meeting
14. Nasset J, Radziszewski P, Hardie C, Leroux D; 2006; ASSESSING the PERFORMANCE and EFFICIENCY of FINE GRINDING TECHNOLOGIES; CMP; Ottawa Canada
15. Nippon Eirich Brochure; 2009
16. Pease J; Elephant in the Mill; 2010; XXV IMPC Proceedings; Brisbane Australia
17. Pease J, Young M, Curry D; 2007; Fine Grinding as Enabling Technology- The IsaMill