

## Новый подход к учету металлов

S. Brochot, M.-V. Durance

11<sup>th</sup> Mill operators' conference 2012 / Hobart, TAS, 29-31 October 2012

### АННОТАЦИЯ

Сложившаяся практика учета металлов во многих случаях не принимает во внимание погрешности, возникающие при измерении параметров потоков, необходимых для расчета баланса металлов. При этом в действительности погрешности измерений возникают на каждом этапе процесса. Это погрешности опробования, аналитические погрешности, погрешности показаний контрольно-измерительных приборов. Принятие во внимание всех таких погрешностей измерений позволяет увеличить точность окончательного баланса металлов и способствует увеличению производительности, оптимизации процессов, улучшению контроля их показателей.

В настоящей статье будут представлены типовые практики учета металлов (формулы по двум и по трем продуктам) и эффект включения погрешностей измерения в процедуру расчета баланса металлов для различных конфигураций производственных циклов.

Для иллюстрации преимуществ такого подхода в части удовлетворения различным требованиям ключевых отделов производственного предприятия, в статье будут приведены примеры программных решений, автоматизирующих процесс учета, методология внедрения таких решений, и типовые задачи периодического учета металлов, возникающие на различных стадиях такого внедрения.

### ВВЕДЕНИЕ

*“Учет металлов — это оценка товарного металла, добытого на руднике и переносимого в потоках цепочки последовательных процессов в заданный промежуток времени ...”* (Morrison, 2008a). Учет металлов получает широкое применение для определения производительности производственных предприятий (извлечение металлов, потери, влияние на окружающую среду) и для точной оценки товарных запасов металлов (инвентаризация запасов, оценка сырья, накопленного на предприятии). Отклонение оценочных и фактических значений товарных запасов может иметь серьезные финансовые последствия. Аналогично, неопределенные оценки извлечения металлов и потерь могут спрятать проблемы в процессах и привести к некорректному производственному планированию. Вот почему *“учет металлов связывает измерение производственных и финансовых показателей”* (Morrison, 2008a). Эти два направления [техническое и финансовое] обладают двумя совершенно различными точками зрения, согласовать которые часто очень сложно. Основным разногласием является неопределенность измерений, которая ведет за собой неточность оценки производственных показателей и товарных запасов.

Неопределенность измерений и методы ее уменьшения широко обсуждались во множестве статей (Morrison, 2008b; Wortly, 2008; Holmes, 2004; 2008; Brochot, 2011). Целью настоящей работы является обозначение методов повышения точности системы учета металлов в процессе использования, включая увеличение глубины данных (объема данных, принимаемого во внимание), оптимизацию методологии и инструментов согласования баланса.

### ПРОЦЕСС УЧЕТА МЕТАЛЛОВ

Учет металлов — это часть глобального корпоративного бухгалтерского учета, являющаяся мощным инструментом для управления металлургическими предприятиями на различных этапах развития: рудник и обогатительная фабрика (концентратор), плавильный завод, гидрометаллургический передел, аффинажный завод, или их комбинация. Это мост между технической и финансовой

точками зрения на учет. Данные процессов, собранные для контроля показателей производительности, используются для определения стоимости продуктов и товарных запасов.

Основной целью системы учета металлов является автоматизация управления параметрами процессов, сведение материального баланса и подготовка отчета по балансу металлов. Вторичной целью системы является применение материального баланса для точного расчета производительностей процессов и помощь руководству в вопросах оптимизации таких процессов. Учет металлов происходит, как правило, по периоду производства. Такой период может определяться регулярным периодом времени или периодом отработки определенного объема сырья. В соответствии с правилами финансового и бухгалтерского учета, в качестве регулярного периода времени, как правило, принимают один месяц.

В течение времени существования предприятия мы можем определить три жизненных цикла для учета металлов:

1. Жизненный цикл системы учета металлов: он начинается с принятия решения о внедрении системы учета металлов в компании и заканчивается с принятием решение о ее удалении.
2. Жизненный цикл изменения производства: включает в себя корректировку системы учета металлов вследствие изменений на производстве, таких как изменение процессов, внедрение нового оборудования или новых продуктов.
3. Жизненный цикл отчета по балансу металлов: Включает в себя все задачи для получения регулярного отчета по балансу металлов.

### **Жизненный цикл системы учета металлов**

С момента принятия компанией решения о внедрении системы учета металлов до момента ее удаления, можно выделить три основных этапа:

- 1.1. Этап внедрения включает в себя все задачи для получения работоспособной и эффективной системы учета металлов.
- 1.2. Этап использования включает в себя все задачи для регулярной подготовки отчета по балансу металлов и обновления системы, в соответствии с заметными изменениями в производстве.
- 1.3. Этап завершения использования включает в себя все задачи для завершения учета металлов, включая период демонтажа предприятия.

Этап внедрения системы учета металлов представляет собой крупный корпоративный проект, затрагивающий большинство отделов предприятия: высшее руководство, бухгалтерию, производство, лаборатории, метрологическую службу, ИТ, закупки, продажи. Для выполнения такой работы, как правило, необходимо собрать проектную команду.

В зависимости от исходного уровня развития предприятия, необходимо принять во внимание следующие задачи:

- детальное определение целей учета металлов и ограничений системы;
- изучение правил бухгалтерского учета и соответствующего законодательства;
- изучение документации по процессам;
- изучение существующей системы измерения параметров потоков;
- определение и внедрение необходимых дополнительных измерений;
- составление бюджета неопределенности измерений (Brochot, 2011), включая определение и внедрение улучшений;
- рассмотрение существующей системы сбора информации по процессам (аппаратной и/или программной) с определением недостающих элементов;
- стандартизация системы измерений;

- разработка системы учета металлов с помощью материального баланса;
- конфигурация исходной модели согласования баланса;
- тестирование и калибровка исходной модели согласования баланса, сначала с использованием исторических данных, затем в текущих промышленных условиях;
- проверка системы учета металлов и ввод в эксплуатацию.

Этап использования системы учета металлов начинается с проверки системы и ее исходной модели согласования данных и заканчивается на последнем до момента начала демонтажа предприятия периоде учета.

Вне зависимости от типа и частоты подготовки материального баланса, должны быть решены следующие задачи:

- расчет согласованного баланса металлов и подготовка соответствующего отчета;
- определение и внедрение любых улучшений системы измерений и управления данными;
- изменение ограничений системы (расширение системы новыми производственными единицами или сужение системы путем исключения производственных узлов);
- все это приводит к обновлению модели согласования баланса.

Этап завершения использования системы начинается в момент принятия решения об остановке производства и закрытии площадки. Для выполнения этапа необходимо выполнить следующие шаги:

- конфигурация последней модели согласования баланса, принимая во внимание вывоз товарных запасов;
- обработка хвостов или управление отходами, созданными в процессе демонтажа;
- расчет баланса металлов в последнем производственном периоде;
- общий или периодический учет металлов в процессе демонтажа с использованием последней модели согласования баланса;
- получение окончательной отчетности;
- резервное копирование баз данных для возможного последующего контроля;
- удаление системы.

Под “моделью согласования баланса” выше понимается совокупность информации, определяющей материальный баланс, а также правила и алгоритмы построения отчетов по балансу металлов на основе первичных данных опробования, полученных на предприятии.

Модель включает в себя:

- определение периодов учета металлов;
- построение схемы движения сырья, включая обозначение балансных единиц и потоков;
- параметры сырья, отслеживаемые в каждом потоке (фазовую модель);
- правила расчета базисных данных для согласования баланса на основе агрегирования первичных данных опробования в установленный период;
- правила расчета соответствующих погрешностей измерений параметров;
- диагностика данных и проверка правил;
- законы сохранения материалов;
- математическая модель для согласования баланса металлов;
- формат отчетности с правилами расчета KPI.

Всеми этими элементами можно управлять в программном пакете Inventeo (Brochot, 2011; Caspeo, 2012).

## **Жизненный цикл изменений производства**

Множество факторов может привести к обновлению системы учета металлов: изменения в процессах, новое сырье, новые продукты, новое оборудование, улучшения в системе измерения параметров, улучшения в методологии расчета материального баланса. Любые такие изменения потребуют модификации модели согласования данных.

В интервале между проверкой модели согласования данных и проверкой обновленной модели согласования данных необходимо выполнить следующие задачи:

- проверка модели согласования баланса;
- расчет баланса металлов и подготовка соответствующей отчетности по множеству периодов;
- определение модификаций системы учета металлов, требующих обновления модели согласования баланса;
- обновление модели согласования баланса;
- тестирование и калибровка обновленной модели согласования баланса в промышленных условиях;
- подтверждение достоверности обновленной модели согласования баланса и ввод в эксплуатацию обновленной системы учета металлов.

Этот интервал должен быть продлен для соответствия более чем одному периоду учета металлов. Если модель согласования баланса необходимо обновлять для каждого расчета баланса металлов, это является индикатором того, что система неправильно сконфигурирована. Компромиссом между редкими обновлениями и неизбежным изменением производства является интервал в полгода (но не менее трех месяцев) между обновлениями. Изменение системы учета металлов должно стать рядовым событием в жизни предприятия. Это обозначает, что систему учета металлов необходимо принимать во внимание при принятии решений о любых изменениях в производстве.

## **Жизненный цикл отчета по балансу металлов**

Жизненный цикл отчета по балансу металлов начинается в момент начала каждого периода учета и заканчивается с проверкой его результатов. Проверка происходит после окончания периода учета и, как правило, после начала следующего периода. Например, если баланс металлов рассчитывается за месяц, период учета начинается первого числа этого месяца и заканчивается первого числа следующего месяца в одно и то же время. Но учет металлов в этом периоде происходит еще несколько дней, в течение которых система получает недостающие измерения, промежуточные подтверждения и проверки, необходимые для подготовки окончательного отчета.

В течение этого времени выполняются следующие задачи:

- часто в течение периода учета: проверка наличия первичных данных опробования, проверка таких данных с использованием инструментов для диагностики, выявление всех исключительных событий, которые могут повлиять на материальный баланс;
- в конце рассматриваемого периода: проверка наличия первичных данных опробования и определение недостающих данных, проверка всех исключительных событий, случившихся в течение периода, которые могут повлиять на материальный баланс, проверка первичных данных опробования и построенных на их основе базисных данных для согласования баланса с помощью инструментов для диагностики, изучение первичных данных опробования и исправление неслучайных ошибок, определение значительных изменений в процессах для последующего внедрения в модель согласования данных, если необходимо;
- ожидание недостающих данных: проверка наличия недостающих данных, проверка первичных данных опробования и соответствующих базисных данных с помощью инструментов для диагностики, изучение первичных данных опробования и исправление

неслучайных ошибок, если недостающие или непроверенные данные остаются, а ошибки становятся явными – повторение предыдущих задач;

- когда все первичные данные опробования собраны, проверены, а неслучайные ошибки исправлены: расчет комплексных базисных данных для согласования баланса, согласование материального баланса, проверка согласованных (сведенных) данных с помощью инструментов для диагностики, определение оставшихся неслучайных ошибок первичных данных опробования или необходимости корректирования, проверка первичных данных опробования, исправление ошибок и возврат к созданию комплексных базисных данных, если необходимо – проведение аргументированной корректировки неслучайных ошибок и базисных данных и возврат к шагу согласования баланса, создание предварительных отчетов, проверка материального баланса;
- создание отчетов по балансу металлов.

Весь спектр указанных выше задач, включая проверки и согласование, можно выстроить в рабочий процесс и решать в программном решении Inventeo.

### **Измерения, погрешности измерений и базисные данные**

Учет металлов основывается на сведениях материального баланса рассматриваемого предприятия. Такой расчет требует наличия первичных данных опробования, таких как масса, влажность, содержание и др., получаемых в результате проведения измерений. Поскольку измерение является случайным процессом, его результат является неопределенным и может быть принят только с некоторой погрешностью измерения (Morrison, 2008b). Это касается измерения массы (Wortley, 2008), влажности, содержания металлов, процента твердого ... такие параметры измеряются, как правило, в рамках опробования, которое само по себе является одной из основных причин неопределенности данных (Holmes 2004; 2008). Для избегания погрешностей при отборе проб и при проведении лабораторных измерений, необходимо предпринимать все возможные усилия. Такие погрешности могут привести к отклонению данных учета металлов от фактических показателей производства, что в свою очередь значительно повышает риск неприемлемых финансовых последствий. Тем не менее, колебаний общей погрешности измерений невозможно ни избежать, ни обойти, и расчет такой погрешности для каждого параметра требует составления бюджета неопределенности (Brochot, 2011).

Количество сырья, обрабатываемого в рассматриваемый период учета металлов, обычно рассчитывается путем суммирования множества измерений масс, таких как загрузка карьерных самосвалов или масса продукта за смену. Аналогично, средняя влажность или содержание металла рассчитываются как средневзвешенные значения соответствующих параметров в множестве проб. Агрегация таких первичных данных опробования дает “базисные данные”, к которым можно отнести сумму общих масс, или средневзвешенное содержание металла в потоке в течение периода учета. С полученными базисными данными, с помощью правил расчета распространения погрешностей (Xiao and Vien, 2003), затем ассоциируется погрешность измерения.

### **Согласование данных путем сведения баланса материалов**

Из-за неопределенности измерений, базисные данные являются несогласованными с точки зрения соответствия законам сохранения материалов (Hodouin and Everell, 1980; Herbst, Mehta and Pate, 1988; Fourniguet et al, 1997). Для иллюстрации такой несогласованности, рассмотрим пример обогатительной фабрики (концентратора) с питанием в качестве входящего потока, и товарным концентратом с хвостами в качестве исходящих потоков. Предполагая, что на фабрике не происходит накопления сырья, масса сухой руды, питающей фабрику в течение определенного периода времени, должна равняться сумме масс сухого концентрата и сухих хвостов, произведенных в тот же период времени. В реальности измерения сухой массы трех потоков имеют

очень маленький шанс соответствия законам сохранения. Аналогично массы металлов также не согласованы из-за неопределенности измерений сухой массы и содержания металлов.

Несогласованность можно наблюдать при избыточности данных, т.е. когда данных больше чем необходимый для расчета материального баланса минимум. Формула “двух продуктов” может применяться для расчета массы концентрата и хвостов, только в случае, когда измеряется массовый расход питания (массы концентрата и хвостов неизвестны) и для каждого из трех потоков взяты и проанализированы пробы. В этом случае нет избыточности данных, за исключением ситуации, когда для каждого потока измеряется несколько содержаний (Guerney, Dungleison and Cameron, 2005).

Целью согласования данных путем сведения баланса материалов является получение набора оценок измеренных параметров, которые настолько близки к значениям таких измеренных параметров, насколько это возможно, и для которых выполняются все законы сохранения. Баланс материалов позволяет описать движение материала в процессах. При этом происходит уточнение производительностей процессов (Durance, Brochot and Mugabi, 2004). Иногда, баланс материалов выявляет неустоявшиеся процессы или недостоверную оценку точности. Избыточность данных позволяет определить значения оценок параметров, которые будут согласованы с точки зрения законов сохранения, и которые при этом будут более точными, чем результаты измерений (Ragot et al, 1990; Ragot and Maquin, 2006). Такой подход позволяет определить ошибочные значения параметров и уменьшить размер погрешности, возникшей при опробовании и лабораторном измерении.

Целью расчета материального баланса является нахождение набора оценочных значений параметров потоков, полностью описывающих все потоки, максимально близких к измеренным значениям таких параметров и для которых выполняются законы сохранения материалов.

Для каждого потока циркулирующий материал можно разложить следующим образом:

$Q_i$	Количество материала в потоке $i$ ; материал может быть сухим или влажным твердым, раствором, пульпой
$X_{ik}$	Доля веса класса материала $k$ в потоке $i$ ; для учета металлов, примером классов материала являются твердое и раствор, а долей – содержание твердого и жидкого (влажность)
$T_{ikl}$	Доля компонента $l$ в классе материала $k$ в потоке $i$
$P_{il}$	Доля компонента $l$ в потоке $i$ ; в случае пульпы, это общее содержание пульпы

Измеренные значения  $\overline{Q_i}, \overline{X_{ik}}, \overline{T_{ikl}}, \overline{P_{il}}$  никогда не удовлетворяют законам сохранения материалов из-за неопределенности измерений и отклонения от позиции баланса. В рамках сведения материального баланса, рассчитываются оценочные значения  $Q_i, X_{ik}, T_{ikl}, P_{il}$ , которые, во-первых, удовлетворяют законам сохранения, во-вторых, имеют наибольшую возможную вероятность быть действительными значениями соответствующих параметров потоков. Последнее эквивалентно поиску таких значений  $Q_i, X_{ik}, T_{ikl}, P_{il}$ , которые будут максимально близкими к измеренным  $\overline{Q_i}, \overline{X_{ik}}, \overline{T_{ikl}}, \overline{P_{il}}$  в соответствии с погрешностью измерений, ассоциированной с каждым таким измеренным значением.

Математически это эквивалентно минимизации целевой функции:

$$J(\gamma) = \sum_i J_i(\gamma)$$

Посредством уравнений законов сохранения (см. ниже), где  $\gamma$  – это вектор оценочных значений ( $Q_i, X_{ik}, T_{ikl}, P_{il}$ ) и  $J_i(\gamma)$  – целевая функция потока  $i$  (Le Guirriec, Brochot and Bergonioux, 1995; Le Guirriec, 1996).  $J_i(\gamma)$  может быть выражено следующим образом:

$$J_i(\gamma) = \left( \frac{Q_i - \bar{Q}_i}{\delta_i \bar{Q}_i} \right)^2 + \sum_k \left( \frac{X_{ik} - \bar{X}_{ik}}{\delta_{ik} \bar{X}_{ik}} \right)^2 + \sum_l \left( \frac{P_{il} - \bar{P}_{il}}{\delta_{il} \bar{P}_{il}} \right)^2 + \sum_{k,l} \left( \frac{T_{ikl} - \bar{T}_{ikl}}{\delta_{ikl} \bar{T}_{ikl}} \right)^2$$

Минимизация целевой функции эквивалентна максимизации функции:

$$e^{-J(\gamma)} = \prod_i e^{-J_i(\gamma)}$$

Эта функция является произведением нормальных распределений вероятности измерений. При решении задачи ее максимизации, достигается максимальная вероятность, а соответствующие оценочные значения параметров являются наиболее вероятными значениями параметров для материального баланса. Такие оценочные значения по-прежнему не являются действительными значениями параметров потоков, действительные значения параметров останутся неизвестными в силу случайного характера (неопределенности) измерений.

Указанная целевая функция использует распределение вероятности измерений содержания металла, например,  $T_{ikl}$ , но не частичный количественный расход такого металла  $Q_i X_{ik} T_{ikl}$ , как это часто бывает (Morrison, Gu and McCallum, 2002). Это чрезвычайно полезно, когда измерения содержания более точные, чем измерения массы.

Ограничения можно разделить на законы сохранения материала, ограничения, определенные пользователем, и ограничения целостности данных.

Законы сохранения материалов применяются к каждому узлу оборудования. Элементы матрицы инцидентности  $M_{ij}$  имеют значение +1, когда поток  $i$  является входящим потоком узла  $j$ , имеют значение -1, когда поток  $i$  является исходящим потоком узла  $j$ , имеют значение 0, когда поток  $i$  не связан с узлом  $j$ . Базовые законы сохранения выражаются следующим образом:

Сохранение общего количества вокруг узла  $j$ :

$$\sum_i M_{ij} Q_i = 0$$

Сохранение частичного количества класса материала  $k$  вокруг узла  $j$ :

$$\sum_i M_{ij} Q_i X_{ik} = 0$$

Сохранение частичного количества компонента  $l$  вокруг узла  $j$ :

$$\sum_i M_{ij} Q_i P_{il} = 0$$

Сохранение частичного количества компонента  $l$  в классе материала  $k$  вокруг узла  $j$ :

$$\sum_i M_{ij} Q_i X_{ik} T_{ikl} = 0$$

Некоторые законы сохранения вокруг узла  $j$  можно суммировать для получения новых законов, которые можно будет использовать для учета, например, фазового перехода при выщелачивании или осаждении.

Ограничения целостности данных это ограничения замыкания, такие как дополнение до 100% или ограничение среднего соотношения:

$$1 - \sum_i X_{ik} = 0 \quad 1 - \sum_i P_{il} = 0 \quad 1 - \sum_i T_{ikl} = 0 \quad P_{il} - \sum_i X_{ik} T_{ikl} = 0$$

Решение системы основывается на формуле Лагранжа и итеративных алгоритмах Newton-Raphson и Ito-Kunish (Le Guirrec, 1996). После решения составляется матрица дисперсий и ковариаций оценочных значений и могут быть вычислены погрешности таких оценочных значений. Такие погрешности будут меньше погрешностей исходных измерений тех же параметров, что подтверждает увеличение точности за счет избыточности данных.

Модуль согласования данных Bilco программного пакета UsimPac был разработан институтом BRGM для решения проблемы материального баланса в области обогащения минералов, которая характеризуется высокой сложностью описания сырья. Модуль предлагал интерактивный, быстрый и точный способ сведения материального баланса в широком диапазоне задач. Он использовался для учета металлов и интегрировался с электронными таблицами через встроенный интерфейс компонентного объектного моделирования (COM) (Durance, Brochot and Mugabi, 2004; Muza, 2005). Сегодня, программный пакет Inventeo предлагает полный комплекс инструментов по учету металлов и работает напрямую с базами данных, минуя электронные таблицы, в соответствии с рекомендациями свода лучших практик по учету металлов AMIRA (AMIRA, 2007; Morrison and Gaylard, 2008).

## **СТЕПЕНЬ ДЕТАЛИЗАЦИИ МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА**

Объем информации, используемой для расчета материального баланса, имеет значительное влияние на точность учета металлов. Luman (2005) подчеркнул увеличение точности материального баланса при использовании промежуточных потоков процессов. Расширение объема исходных данных (глубины, степени детализации) системы затрагивает частоту учета, схему перемещения материалов, параметры материалов при согласовании многофазных и многоэлементных данных, способ оценки товарных запасов и незавершенного производства, или сырых данных, используемых для расчета базисных данных.

### **Частота учета**

Учет металлов происходит, как правило, по периоду производства. Такой период может определяться регулярным периодом времени или периодом отработки определенного объема сырья. Регулярный период времени, как правило, составляет один календарный месяц, начинается в определенный момент времени первого дня месяца и заканчивается в тот же момент времени первого дня следующего месяца. Периодом также могут быть квартал и год, для, соответственно, квартальной и годовой отчетности. Или день/смена для оперативного контроля процессов. Подход с временем отработки определенного объема сырья, как правило, применяется для оперативного контроля процессов, но может включен и консолидирован в баланс по регулярному периоду времени. В обоих случаях учет металлов является регулярно повторяющейся итеративной задачей.

На большинстве предприятий бухгалтерия ведет учет металлов по месяцам. Это связано с ежемесячной инвентаризацией, позволяющей более точно оценить товарные запасы и объем незавершенного производства (см. ниже). Квартальный и годовой отчет обычно получают суммированием результатов ежемесячного учета. Даже если такой подход в той или иной степени разрешен правилами бухгалтерского учета и законодательством, он определенно не является самым точным. Действительно, расчет материального баланса за более длительный период времени позволяет снизить значения товарных запасов на моменты начала и завершения учета, в



сравнении с общим передвижением материала. Поскольку обычно принимается, что оценка товарных запасов менее точная чем передвижение материала (Wortley, 2008; Holmes, 2008; Connolly, 2009), снижается вес колебаний оценки товарных запасов в общих колебаниях учета металлов. Кроме этого, ежегодно может проводиться специализированная инвентаризация, в рамках которой применяются более точные методики измерений.

Напротив, короткий период учета в целом менее точен. Если расчет материального баланса за день или за смену представляет интерес с точки зрения оперативного контроля и производственной отчетности, его нельзя использовать как есть в целях учета металлов. Действительно, инвентаризация не проводится с такой частотой, и любая оценка запасов будет обладать большой погрешностью (Cargill, Freeman and Gilbertson, 2002; Muza, 2005). Поэтому можно использовать промежуточную частоту, например, еженедельно, как это принято на золотоизвлекательных предприятиях (Gurney, Dunglison and Cameron, 2005; Guerney, 2008).

### **Диаграмма перемещения материала**

Большинство систем учета металлов ограничивают детализацию схем перемещения материалов крупными балансными объектами, представляющими целую фабрику, и соответствующими входящими и исходящими потоками (Morrison, Gu and McCallum, 2002; Jansen, Morrison and Dunn, 2007). В случае горнорудных компаний согласование данных между рудником и фабрикой (концентратором) происходит посредством использования промежуточных отвалов и/или штабелей (Morrison, Gu and McCallum, 2002; Morley and Moller, 2005). Подход одного объекта также используется по каждой производственной площадке. В таком случае, материальный баланс рассчитывается последовательно с риском накопления погрешностей от одной площадки к следующей (Cargill, Freeman and Gilbertson, 2002).

Избыточность данных это способ увеличить точность материального баланса. Из-за распространения колебаний в законах сохранения материалов, погрешность, ассоциированная с согласованными данными (т. е. с оценками параметров потоков, полученными в процессе согласования данных путем статистического сведения баланса материалов), меньше погрешности, ассоциированной с соответствующими базисными данными, рассчитанными из измерений. Одним из способов получения избыточности данных в системе, является использование более детальной схемы перемещения материала с промежуточными потоками и узлами. Схема тем не менее должна быть ограничена потоками, которые можно измерить: взвесить, опробовать, провести химический анализ. Число потоков, которые нельзя или невозможно измерить, должно быть сведено к минимуму. Если потоки между несколькими узлами оборудования не поддаются измерению, такие блоки оборудования необходимо группировать в отдельные объекты схемы. Например, если в замкнутом цикле измельчения нельзя измерить (взвесить, опробовать) циркуляционную нагрузку, мельницы и гидроциклоны необходимо сгруппировать в один объект. В этом случае питание цикла будет входящим потоком такого узла, а слив гидроциклонов – исходящим.

При использовании единственного объекта на фабрику для расчета материального баланса, товарные запасы и незавершенное производство укрупняются до масштабов такого узла и учитываются совместно. При использовании промежуточных узлов, товарные запасы учитываются индивидуально с помощью отдельного специального объекта, незавершенное производство также учитывается индивидуально на уровне объекта, обозначающего единицу/группу единиц оборудования. В этом случае колебания объёмов товарных запасов напрямую связано с входящими/исходящими потоками. Это приводит к избыточности данных и положительно сказывается на точности измерения товарных запасов и незавершенного производства.

Увеличение точности при повышении глубины схемы перемещения материала было теоретически доказано и проиллюстрировано на ряде конкретных примеров (Lytan, 2005).

## Многофазный и многоэлементный баланс

Всегда предпочтительнее использовать первичные данные опробования параметров, полученные напрямую при проведении измерений, чем значения тех же параметров, полученные в результате расчетов на основании таких измерений. Это случай, применимый к влажной массе и влажности. Большинство систем учета металлов используют сухую массу для материального баланса твердого (Morrison, Gu and McCallum, 2002; Guerne, Dungleison and Cameron, 2005; Jansen, Morrison and Dunn, 2007). Сухая масса хорошо рассчитывается из измеренной влажной массы и влажности, вместе с тем, в этом случае только сухая масса используется для согласования данных. Если измерительная система позволяет рассчитывать баланс воды, предпочтительнее использовать влажную массу и содержание твердого (дополнение к содержанию влаги) для баланса твердого. В этом случае имеем следующие переменные:

$Q_i$	Масса материала (твердого и воды) в потоке $i$
$X_{is}$	Доля веса твердого в потоке $i$

И соответствующий закон сохранения сухого твердого:

$$\sum_i M_{ij} Q_i X_{is} = 0$$

Преимущество этих формул заключается в возможности сохранения индивидуальной точности измерений влажной массы и содержания твердого. Это также увеличивает объем данных (избыточность), когда одновременно может быть рассчитан баланс воды.

При рассмотрении гидрометаллургических заводов многофазный баланс является абсолютно необходимым (Deglon and Gaylard, 2008). При рассмотрении переделов выщелачивания или избирательного осаждения, рабочим материалом является пульпа с твердым (руда или осадки) и раствор. Оба характеризуются содержанием металлов (металлов или других элементов, подходящих для учета металлов). В этом случае имеем следующие переменные:

$Q_i$	Масса пульпы в потоке $i$
$X_{is}$	Доля веса твердого в потоке $i$
$X_{il}$	Доля веса жидкого (раствора) в потоке $i$
$T_{ism}$	Доля металла $m$ в твердом в потоке $i$
$T_{ikl}$	Доля металла $m$ в жидком в потоке $i$

С ограничением:

$$1 - X_{is} - X_{il} = 0$$

Законы сохранения материала в этом случае следующие:

- закон сохранения пульпы, который всегда выполняется (за исключением случая, когда потери, например, при испарении, нельзя измерить):

$$\sum_i M_{ij} Q_i = 0$$

- закон сохранения твердого, который выполняется на всех стадиях процесса, в рамках которых твердое не растворяется и не осаждается, например, обезвоживание, фильтрация, классификация или цианирование (т.е. для которых потери твердой массы несущественны в сравнении с погрешностью измерения):

$$\sum_i M_{ij} Q_i X_{is} = 0$$

- закон сохранения жидкого, который выполняется на всех стадиях процесса, в рамках которых твердое не растворяется и не осаждается:

$$\sum_i M_{ij} Q_i X_{il} = 0$$

- закон сохранения металла m в твердом, который выполняется на всех стадиях процесса, в рамках которых металл не растворяется и не осаждается:

$$\sum_i M_{ij} Q_i X_{is} T_{ism} = 0$$

- закон сохранения металла m в жидком, который выполняется на всех стадиях процесса, в рамках которых металл не растворяется и не осаждается:

$$\sum_i M_{ij} Q_i X_{il} T_{ilm} = 0$$

В случае фазового перехода (растворение или осаждение твердого) необходимо учитывать общую массу металла m:

$$\sum_i M_{ij} Q_i X_{is} T_{ism} + \sum_i M_{ij} Q_i X_{il} T_{ilm} = 0$$

Все эти уравнения основываются на массе, в то время, как измерения в основном основываются на объеме (объем чанов, объемные расходомеры). Поэтому необходимо измерять плотность пульпы, и погрешность расчета массы будет зависеть от погрешности измерения плотности.

Одновременный расчет материального баланса множества компонентов приводит к избыточности данных и способствует увеличению точности учета металлов (Morrison, Gu and McCallum, 2002; Guerney, Dungleison and Cameron, 2005). Выбор параметров для согласования имеет огромное влияние на качество и точность материального баланса. Прежде всего необходимо учитывать коммерческие металлы (или компоненты). Вместе с тем, и другие компоненты могут быть учтены за их способность увеличить точность материального баланса. Это относится к компонентам, для которых можно очень точно измерить содержание. Параметры таких компонентов могут улучшить неточные оценки некоторых масс. Некоторые компоненты, которые явно отделяются в некоторых операциях могут существенно улучшить материальный баланс в потоках, где измерить массы невозможно. Например, на пирометаллургических переделах, где сохранение массы не будет соблюдаться из-за потерь газа, можно достаточно точно измерить такие компоненты, как кремний, который в печи переходит в сульфидный сплав и шлак.

## **Инвентаризация товарных запасов и незавершенного производства**

Существует два основных метода управления инвентаризацией:

1. Качественно-количественные показатели действительных товарных запасов учитываются на начало и на окончание периода. Запасы на начало периода затем принимаются за входящий поток, а запасы на окончание периода – за исходящий. При этом запасы на момент окончания текущего периода становятся запасами на момент начала следующего периода.
2. Учитывается только колебание массы запасов. Учитывается в качестве исходящего потока. Положительное значение для массы принимается при увеличении запасов, отрицательное – при уменьшении.

Как правило, первый метод предпочтительнее, поскольку является более близким к действительности и инвентаризация дает оценку качественно-количественных показателей запасов в определенный момент времени. Второй метод подходит в случае неопределенности количества запасов, которое нельзя измерить напрямую.

Как было отмечено ранее, инвентаризация — это сложный процесс, который является менее точным, чем передвижение материала (Wortley, 2008; Holmes, 2008; Connelly, 2009). Измерение незавершенного производства также является сложным и в целом значительно менее точным. Иногда предпочтительнее “рассчитать” запасы (масса и содержания) на основе данных, измеренных в условиях движущегося сырья. В этом случае используется “модель складов” рассматривающая потоки погрузки-разгрузки в соответствии с расписанием (качество и количество материала по времени). В этом случае склады могут быть рассмотрены в качестве идеального смесителя (например, как чан с мешалкой), или в качестве складов, работающих по методам FIFO или LIFO. При использовании такого подхода, предпочтительнее каждый склад (отвал, штабель, бункер и др.) обозначать на схеме передвижения материала отдельным объектом. Здесь основным риском является накопление отклонений между ожидаемым и действительным количеством запасов, и получение через несколько периодов картины весьма далекой от реальности. Управление малыми складами с частым уменьшением запасов может уменьшить риск и будет способствовать более точному материальному балансу.

Более продвинутое моделирование складов может быть необходимо если инвентаризация слишком сложная или является очень дорогостоящей процедурой, как в случае с кучным выщелачиванием (Gebhardt and Cross, 2008).

### **Расчет базисных данных**

Как указано выше, базисные данные получаются в результате суммирования масс или средневзвешенных значений содержания. Предпочтительнее использовать первичные данные опробования, чем данные обработанные в другой системе или БД реального времени для структурирования исторических данных по процессам. Основной сложностью остается ассоциация масс и содержаний для расчета средневзвешенных значений, более точных чем обычное среднее.

### **ПРОГРАММНЫЙ ПАКЕТ INVENTEO**

Программный пакет Inventeo (Caspeo, 2012) предлагает набор инструментов для решения большинства задач, описанных выше, с помощью встроенной модели согласования данных. Система позволяет конфигурировать частоту учета и отрабатывать различные сценарии производства в зависимости от объема и качества сырых данных. Программа предоставляет возможность построить схему перемещения материала с любой требуемой детализацией. Встроенная утилита для определения фазовой модели позволяет описать материал в форме

множества фаз, имеющих до двух уровней глубины описания параметров каждая (например, содержание твердого/жидкого и содержание металлов). Базисные данные можно получать путем агрегации первичных данных опробования напрямую из сторонних БД. Аналогично, модели колебаний рассчитывают погрешность измерения каждого базисного параметра в процессе согласования баланса. Законы сохранения материала можно создавать и изменять в соответствии с потребностями конкретных задач. Встроенный в программу инструментарий для анализа поможет в определении аномальных значений базисных данных, выходящих за пределы допустимого отклонения.

Встроенный алгоритм согласования баланса рассчитывает статистически сведенный материальный баланс в один проход. Все потоки и компоненты рассчитываются одновременно, принимая во внимание погрешности базисных данных. По окончании расчета материального баланса рассчитываются значения погрешностей, ассоциированных с вновь полученными значениями параметров. Эти погрешности меньше погрешностей соответствующих базисных данных, поэтому в итоге получается более точный расчет баланса металлов. Инструменты анализа, основанные на статистическом сравнении базисных и согласованных данных, позволяют увидеть все проблемы, такие как отклонения данных или неучтенные потери.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Система учета металлов должна согласовывать две точки зрения: техническую, для которой материальный баланс есть результат статистического подхода к действительности, и финансовую, для которой баланс металлов есть конкретная согласованная цифра в учетной системе. Тем не менее, материальный баланс основывается на измерениях, которые являются случайными процессами. Поэтому в процессе согласования данных необходимо учитывать погрешность таких измерений. Если согласование данных построено на статистическом сведении материального баланса, как это описано выше по тексту и как это реализовано в программном пакете Inventeo, полученные в рамках согласования параметры являются более вероятными нежели данные измерений. Такие согласованные данные могут быть приняты с финансовой точки зрения, если в будущем они не будут уточняться из-за неправильной оценки. Любая будущая корректировка данных должна быть минимальной настолько, насколько это возможно, и должна быть принята во внимание как можно скорее. Такие корректировки могут быть учтены как прибыли и убытки и представлены в виде определенных и неучтенных потерь. Только точная, согласованная и прозрачная система учета металлов может предоставить такие преимущества.

В статье был представлен ряд способов увеличения точности системы учета металлов. Внедрение и сопровождение такой системы представляется одним из ключевых проектов предприятия, который потребует постоянных улучшений, связанных с изменениями в процессах и улучшениями в системе измерения параметров потоков. В случае выбора программного пакета Inventeo, способного автоматизировать решение всех указанных выше задач, ключом к успешному проекту будет являться максимальное вовлечение специалистов предприятия в процесс внедрения.

Разработчик INVENTEO:

Caspeo - BP 36009 - 45060 ORLEAN CEDEX 2 - Франция

Тел.: 02 38 64 31 96 - Факс 02 38 25 97 42 - e-mail: [info@caspeo.net](mailto:info@caspeo.net)

Компания с ограниченной ответственностью.

RCS Орлеан. SIRET 451785 687 00018

Эксклюзивный дистрибьютор Caspeo в РФ и СНГ:

Вычислительные Системы, ООО

ул. Кутателадзе, 4г-238, г. Новосибирск, РФ, 630128

Тел.: +7-383-214-09-53, e-mail: [sales@procsim.ru](mailto:sales@procsim.ru)