

# Полная погрешность измерения – Теория отбора проб и бюджеты неопределенности в металлургическом учете

Стефан Брошо

Caspeo, SARL, ул. Авеню Клода Гиймен, 3, г. Орлеан, Франция

Труды конференции WCSB7, Июнь 2015

## АННОТАЦИЯ

Учет металлов является одним из основных инструментов финансового и технического управления в металлургической отрасли. Он основывается на измерениях и поэтому должен справляться с неопределенностью, свойственной измерительным процессам. Неопределенность в металлургическом учете формирует финансовый риск. Точность результатов учета металлов напрямую связана с точностью материального баланса и затем с точностью измерений массы и содержаний. Оценка полной погрешности измерения через ее распределение вероятности или ее моменты первого и второго порядка (математическое ожидание и дисперсию) может содействовать принятию корпоративных решений.

Полная погрешность измерения может быть посчитана и проанализирована путем составления бюджета неопределенности. Хотя этот подход был создан в основном для расчета аналитической погрешности (см. ИСО/МЭК Руководство по выражению неопределенности измерений – ISO/IEC GUM), он должен учитывать и процедуру отбора проб. Аналогичный подход предложен Пьером Ги в рамках Теории отбора проб, пусть и не называется непосредственно «бюджетом неопределенности» - различные компоненты полной погрешности измерения полностью определяются и описываются в части свойств и их относительного веса (вклада в общую погрешность).

Настоящая статья предлагает методологию построения бюджетов неопределенности в контексте внедрения системы учета металлов. Методологию можно применять к существующей измерительной системе предприятия и затем анализировать результаты с целью нахождения способов увеличения точности измерений. Кроме этого, методологию можно использовать для определения новых измерительных процедур, направленных на обеспечение лучшей точности. Для иллюстрации обоих применений статья приводит несколько примеров из практики.

## ВВЕДЕНИЕ

Хотя «учет металлов — это оценка (товарного) металла, добытого на руднике и проведенного по последующим технологическим потокам в определенный промежуток времени» [1], он получил широкое применение для оценки производительности предприятий (извлечение металла, потери, воздействие на окружающую среду) и для формирования точной оценки запасов (складов и НЗП). Значительное расхождение между оценочными и фактическими значениями показателей запасов может иметь существенные финансовые последствия. Схожим образом, неточная оценка извлечения и потерь может прятать проблемы в технологических процессах и способствовать неправильному планированию производства. По этой причине «учет металлов предоставляет способ взаимодействия при оценке результатов технической и финансовой деятельности» [1]. Эти два направления обладают двумя совершенно разными точками зрения на учет, что приводит к сложностям при согласовании. Основной темой разногласий является неопределенность измерений, которая предполагает неопределенность оценки производства и запасов.

Неопределенность измерений и способы ее сокращения широко обсуждались в ряде работ [2-6]. Целью настоящей статьи является предложение методики, позволяющей количественно оценить неопределенность путем составления бюджета неопределенности любого измерения, используемого в рамках металлургического учета. Для оценки текущей ситуации на предприятии,

сбора всей информации, необходимой для составления бюджетов неопределенности и выдачи рекомендаций по увеличению точности измерений, требуется проведение аудита измерительной системы.

## **ВНЕДРЕНИЕ УЧЕТА МЕТАЛЛОВ**

Металлургический учет является одним из компонентов общего бухгалтерского учета предприятия [7, 8] и представляет собой мощный инструмент для управления компаниями, в различной степени занимающимися производством металлов: рудник-фабрика, фабрика, плавильный или гидрометаллургический завод, аффинажный завод, или комбинация этих переделов. Учет металлов является мостом между технической и финансовой точками зрения на производственный процесс. Технологические данные, формируемые для управления производством, используются также для оценки продуктов и складов с целью подготовки финансовых данных.

Основной целью системы учета металлов является помощь компании в управлении технологическими данными, используемыми при составлении материального баланса, для формирования отчета по балансу металлов (например, отчета по товарному балансу и др.). Вспомогательной целью системы учета металлов является предоставление компании инструмента для использования материального баланса для более точного расчета показателей производительности производственных процессов и помощи технологам в их оптимизации. Учет металлов как правило выполняется для периода производства. Этот период может быть определен регулярным периодом времени или периодом производства партии материала. В соответствии с устоявшимися правилами учета, регулярный период времени как правило составляет один месяц.

В рамках жизненного цикла предприятия мы можем рассмотреть три жизненных цикла для металлургического учета:

- жизненный цикл системы учета металлов: начинается с решения о внедрении системы учета металлов на предприятии и заканчивается решением об остановке ее использования;
- жизненный цикл развития производства: охватывает корректировки системы учета металлов вследствие развития производства (изменения в процессах, новые производственные мощности или новые типы продукции);
- жизненный цикл учета металлов: включает периодические задачи по составлению регулярного отчета по балансу металлов.

Три соответствующих периода выделяют с момента принятия компанией решения о внедрении системы учета металлов и до завершения ее использования. Период «Внедрения» группирует всю деятельность для создания рабочей и эффективной системы учета металлов. Период «Производства» включает все задачи, связанные с формированием регулярных отчетов по балансу металлов и модернизацией системы в соответствии с значительными изменениями в технологических процессах. Период «Закрытия» состоит из формирования итогового отчета по балансу металлов с учетом закрытия и возможного демонтажа предприятия.

Внедрение системы учета металлов — это всегда проект, в котором задействована вся компания и в котором участвуют представители всех основных ее блоков: высшее руководство, финансы, бухгалтерия, производство, лаборатория, ИТ, закупки, продажи, и др. В зависимости от уровня развития предприятия необходимо рассмотреть множество различных задач [9]. Настоящая статья касается некоторых из них: обзор существующей измерительной системы, проектирование и внедрение необходимых дополнительных контрольных точек, составление бюджетов неопределенности [6], включая определение и внедрение некоторых улучшений, стандартизация измерительной системы.

## **Измерения – основа учета металлов**

Металлургический учет основывается на расчете материального баланса рассматриваемой системы. Для расчета необходимы первичные данные, такие, как массы, содержания влаги и металлов, получаемые из измерений. Поскольку измерение представляет собой случайный процесс, его результат является неопределенным. При этом такую неопределенность возможно количественно оценить через соответствующую погрешность измерения [2]. Это касается измерений массы [3], содержания влаги, металлов, процента твердого или плотности, и др. Последние перечисленные измерения как правило требуют проведения отбора проб (в том числе в рамках подготовки пробы), который является основным источником неопределенности [4, 5]. Необходимо предпринимать все возможные усилия для обеспечения правильности выполнения отбора проб и измерений, и исключения любых систематических погрешностей. Такие систематические погрешности будут приводить к расхождениям между металлургическим учетом и фактическим производством с риском неприемлемых финансовых последствий. Вместе с тем, погрешность измерения невозможно исключить, и для расчета ее полного значения требуется составление бюджета неопределенности [6].

Количество материала, обработанного за рассматриваемый период учета металлов, в большинстве случаев формируется путем суммирования множества измерений массы, таких, как вес загрузки самосвала или вес продукции за смену. Схожим образом, среднее значение содержания влаги или металла рассчитывается как средневзвешенное значение содержания в множестве проб. Агрегация таких первичных данных формирует «базисные данные» баланса металлов, представляющие собой сумму полных масс материала или средних содержаний за учетный период. Погрешность измерения затем может быть ассоциирована с каждым параметром базисных данных путем использования правил распространения погрешностей [10].

## **Погрешность измерения и согласование данных**

В силу неопределенности измерений, базисные данные являются несогласованными относительно законов сохранения материала [11, 12]. Несогласованность возможно наблюдать при наличии избыточного объема данных: когда данных измерений больше, чем минимально необходимое для расчета материального баланса количество (как следствие, возникает множество возможностей расчета одного и того же параметра, используемого при расчете баланса – например, выхода или извлечения по участку – и, в силу неточности измерений, отличающихся результатов будет столько же много, сколько и различных способов их пересчета). Целью согласования данных является нахождение набора оценочных значений показателей, максимально близких к их исходным измеренным значениям относительно погрешностей измерения, и для которых при этом выполнялись бы законы сохранения материала. Иногда такой расчет выявляет неустановившиеся процессы или плохую оценку точности измерений. Избыточность данных в свою очередь позволяет найти согласованные оценочные значения, более точные, чем измеренные [13, 14]. Такой подход позволит определить аномальные значения показателей предприятия и сократить погрешность отбора проб и измерения.

## **ПОЛНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ**

Относительная погрешность измерения показателя определяется как разница между его измеренным и истинным значениями, разделенная на его истинное значение, которое по определению неизвестно. Независимо от процедуры измерения, вследствие естественной изменчивости показателей, погрешность измерения является случайной величиной, следующей закону распределения вероятностей, который можно определить с помощью различных подходов. В рамках статистического подхода, одно и то же измерение выполняется большое число раз, затем на полученных результатах собирается статистика. Такой подход, относящийся к оценке типа А, называется апостериорным, его применение при выполнении измерений необходимо для

определения закона распределения вероятностей. Вероятностный подход – оценка типа В – называется априорным поскольку основывается на теориях, таких, как Теория отбора проб. Для оценки полной погрешности измерения возможно использовать комбинацию этих двух подходов. Для характеристики погрешности используются моменты распределения вероятности. Первый момент, математическое ожидание, дает оценку систематической погрешности, т. е. систематического отклонения между измеренными и истинными значениями показателя, представляет собой меру точности измерения. Второй момент, дисперсия, количественно оценивает воспроизводимость (или прецизионность) измерения.

### **Компоненты погрешности измерения**

Полная погрешность измерения (OE) включает множество составляющих, которые, следуя классификации Пьера Ги [15-17], возможно разделить в два основных компонента: полную погрешность отбора проб (TE) и аналитическую погрешность (AE).

Причиной аналитической погрешности часто является несовершенство процедур и средств, используемых для выполнения аналитических операций [19]. Если рассмотреть процедуры определения содержания влаги или металла, анализ выполняется на пробе, полученной в рамках последней стадии отбора проб (пробоподготовки), выполняемой как правило в лаборатории. Оценка аналитической погрешности требует разложения соответствующей процедуры на этапы с целью нахождения источников погрешности. Затем для расчета полной аналитической погрешности используются специальные расчетные правила и метрологический подход. Другой подход, применяемый в основном в рамках процедур обеспечения и контроля качества (QAQC), основывается на анализе отклонений результатов большого числа выполненных измерений [18].

Полная погрешность отбора проб в свою очередь должна учитывать последовательность стадий измельчения и сокращения количества материала. Она представляет собой сумму полных погрешностей отбора проб каждой стадии (TE<sub>n</sub>). Под стадиями понимается первичный отбор из процесса и отбор в рамках каждого этапа подготовки пробы для лабораторного анализа. В рамках операций по подготовке проб формируется погрешность подготовки точечной пробы (PE), источниками которой могут являться, например, загрязнение пробы другими материалами, потери материала, химическое и физическое изменение материала, намеренные и ненамеренные ошибки персонала, которые могут случиться в процессе подготовки.

Операция отбора небольшого количества материала от лота с целью получения пробы формирует следующие погрешности:

- фундаментальная погрешность отбора проб (FSE) и погрешность объединения и сегрегации (GSE), совместно именуемые погрешностью краткосрочной интеграции процессов (PE<sub>1</sub>), причиной которой является неоднородность состава материала (в материале могут смешиваться различные типы частиц с различными характеристиками: размером, составом, плотностью, и др.);
- погрешность долгосрочной (PE<sub>2</sub>) и периодической (PE<sub>3</sub>) интеграции процессов, а также погрешность взвешивания точечной пробы (IWE) происходят в свою очередь от неоднородности распределения материала в пространстве или по времени (пропорции различных типов частиц в материале могут меняться от одного места отбора к другому, от одного момента времени отбора к другому);
- погрешность формирования точечной пробы, состоящая из погрешности ограничения объема (IDE) и погрешности извлечения (IEE).

## **Бюджет неопределенности**

Оценка полной погрешности требует описания всех ее источников по ходу процесса измерения, начиная с исходного лота, который необходимо измерить, заканчивая использованием результатов анализа. Перечень источников погрешности формируется на основании этапа предварительного обследования измерительной системы предприятия. У этого этапа две основные цели: расчет полной погрешности измерения и улучшение измерительного процесса везде, где это возможно, с целью снижения такой погрешности и исключения систематических погрешностей.

Бюджет неопределенности представляет собой перечень всех компонентов полной погрешности измерения и их веса в общем значении. Анализ распределения компонентов позволяет сфокусироваться на тех из них, что вносят основной вклад. Составление такого перечня требует априорного подхода типа В. Действительно, извлечение компонентов погрешности из анализа отклонений результатов большого числа измерений, что подразумевается в рамках апостериорного подхода типа А, представляется чрезвычайно сложной задачей. Вместе с тем, некоторые компоненты погрешности могут быть получены именно путем применения апостериорного подхода, например компонент, связанный с воспроизводимостью устройства, или, в части отбора проб, погрешности интеграции процессов (PIE<sub>x</sub>), получаемые из данных хроностатистики (исторических данных) [15, 16].

## **АУДИТ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ**

Необходимо отметить, что в рамках настоящей статьи термин «измерительная система» относится ко всем аспектам измерений и включает:

- все инструменты, используемые для выполнения измерений, включая отбор и подготовку проб, лабораторию;
- соответствующая документация: руководства по использованию, журналы обслуживания, журналы калибровки, сертификаты поверки, и др.
- измерительные процедуры, включая отбор и подготовку проб, анализ;
- управление и хранение результатов измерения;
- документация по обеспечению и контролю качества (QAQC): процедуры, отчеты;
- бюджеты неопределенности по всем относящимся к делу показателям;
- хранилища первичных данных измерений.

Первым этапом аудита является анализ фактического состояния измерительной системы. Этап начинается с составления перечня показателей, требуемых для выполнения регулярного учета металлов, который затем сравнивается с перечнем фактически выполняемых измерений. Этот этап требует особого внимания. Действительно, определение схемы балансовых объектов [9] и степени ее детализации (диаграммы, включающей основные производственные участки, передвижения материалов и учитываемые в балансе склады), часто зависит от существующих измерений, в то время как здравый смысл диктует обратное: определить схему с целью точного учета металлов, затем определить местоположение, спроектировать и установить контрольные точки. Сравнение перечней необходимых и фактически выполняемых измерений позволяет грубо оценить «стоимость» модернизации измерительной системы.

Каждое фактически выполняемое измерение затем подвергается подробному анализу. Для ознакомления с измерительной системой – для проверки фактического расположения точек отбора проб, измеряемого материала, условий эксплуатации оборудования, навыков операторов, и др. – требуется посещение площадки предприятия. В рамках посещения производится сбор всей документации и материалов по оборудованию (руководства пользователя, технические паспорта, журналы обслуживания и калибровки), по процедурам (отбора и подготовки проб, лабораторного анализа, правилам безопасности), в части управления и контроля качества (процедуры и отчеты). Также, для целей последующего статистического анализа, проводится сбор исторических данных из

БД различных информационных систем, применяемых на предприятии, в том числе систем типа Хисториан (БДРВ).

Техническая документация на оборудование позволяет составить перечень «внутренних» источников погрешности и собрать количественные значения некоторых параметров оборудования, которые возможно будет использовать для оценки соответствующих ее компонентов (например, дискретность, температурная чувствительность). Регламенты/стандарты выполнения процедур подробно описывают процессы измерения со всеми их этапами и потенциальными источниками погрешности, которые могут возникнуть на каждом этапе. Перечень компонентов для учета в бюджете неопределенности формируется на основании обоих указанных типов документации. Когда документация отсутствует, необходимо проведение интервью с ответственными за работу с оборудованием/выполнение процедур специалистами. Даже если документация в наличии, проведение таких интервью всегда полезно, поскольку позволяет определить степень отступления практики от нормативных документов.

### **Характеристика материалов для формирования модели неоднородности**

Теория отбора проб предоставляет руководство в части расчета фундаментальной погрешности отбора проб. Расчет начинается с формирования модели неоднородности материала - описания неоднородности материала в части измеряемого параметра (например, содержания влаги, содержания металла, плотности пульпы, и др.). Подробное описание неоднородности может быть выполнено на основании различных источников данных по материалу: минералогических исследований, включая количественную минералогию, использующую анализ изображений, анализ гранулометрического распределения и распределения плотности, исследований на обогатимость, технологических данных, и др. Такая модель неоднородности материала должна быть сформирована для каждой стадии процедуры отбора проб. Действительно, если перед отбором очередной пробы материал подвергается измельчению, неоднородность материала изменяется в части гранулометрического распределения и раскрытия минералов. Как правило, большая часть необходимой информации доступна в собранных на площадке материалах. При отсутствии данных, для уточнения характеристики материала может потребоваться выполнение специальных исследований.

Лучшим способом оценки компонентов погрешности интеграции процессов (PIE), которые по большей части зависят именно от неоднородности распределения, является вариографический анализ [15, 16, 20]. Такие исследования редко доступны до выполнения аудита. В некоторых случаях, исторических данных достаточно для получения предварительного понимания изменчивости процессов. При этом рядовые контрольные точки редко соответствуют операционным условиям, требуемым для выполнения такого исследования (например, измерения для технологического баланса или оперативного управления процессами). Поэтому такой анализ чаще выполняется для наиболее важных контрольных точек, где выгоды явно превысят затраты (например, измерение показателей, применяемых в товарном балансе).

Выполнение этой задачи требует междисциплинарного подхода – модель неоднородности строится на заключениях, представленных в самых различных источниках данных. Более того, как правило требуется рассмотрение и использование некоторых разумных предположений.

### **Аудиторский отчет**

Основная часть итогового отчета касается бюджетов неопределенности. Это позволяет присвоить количественное значение погрешности каждому измерению, используемому при расчете баланса металлов и, как следствие, при согласовании данных. Бюджет неопределенности включает основные компоненты полной погрешности измерения и указывает на узкие места, где возможны улучшения, что позволяет сформулировать рекомендации по оптимизации измерительной системы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Система учета металлов должна согласовывать две точки зрения: техническую, для которой материальный баланс это продукт, в котором всегда есть место статистике, и финансовую, для которой материальный баланс представляет собой конкретную согласованную экономическую стоимость в учетной системе. Вместе с тем, материальный баланс основан на измерениях, которые по определению являются случайными процессами. Поэтому погрешности измерения должны обязательно приниматься во внимание в случае корректировок показателей при согласовании данных (при сведении) баланса. Если согласование данных проводится с учетом погрешностей измерения, полученные оценочные значения показателей будут более вероятными, чем их исходные измеренные значения.

В рамках внедрения системы учета металлов, с целью формирования точной количественной оценки полных погрешностей измерения основных балансовых показателей, необходимо проведение предварительного обследования существующей измерительной системы предприятия. Такие погрешности используются системой при сведении баланса и отражают уровень точности соответствующих значений. Более того, анализ бюджетов неопределенности показывает ключевые компоненты полной погрешности измерения и узкие места, где, с целью ее снижения, может быть выполнена оптимизация.

Компания с ограниченной ответственностью Caspeo  
BP 36009 - 45060 ORLEANS CEDEX 2 - Франция  
Тел.: 02 38 64 31 96 - Факс 02 38 25 97 42 - e-mail: [info@caspeo.net](mailto:info@caspeo.net)

Эксклюзивный дистрибьютор Caspeo в РФ и СНГ:  
Вычислительные Системы, ООО  
ул. Кутателадзе, 4г, г. Новосибирск, РФ, 630128  
Тел.: +7 (383) 214-09-53, e-mail: [sales@procsim.ru](mailto:sales@procsim.ru)

## ЛИТЕРАТУРА

1. R.D. Morrison, "Motivation for and benefits of accurate metal accounting", in *An Introduction to Metal Balancing and Reconciliation*, Ed by
2. R.D. Morrison. Julius Kruttschmitt Mineral Research Centre, Indooroopilly, Australia, pp. 3-23 (2008).
3. R.D. Morrison, "Basic statistical concepts for measurement and sampling", in *An Introduction to Metal Balancing and Reconciliation*, Ed by
4. R.D. Morrison. Julius Kruttschmitt Mineral Research Centre, Indooroopilly, Australia, pp. 27-75 (2008).
5. M. Wortley, "Mass measurement", in *An Introduction to Metal Balancing and Reconciliation*, Ed by R.D. Morrison. Julius Kruttschmitt Mineral Research Centre, Indooroopilly, Australia, pp. 77-139 (2008).
6. R.J. Holmes, "Correct sampling and measurement the foundation of accurate metallurgical accounting", *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 74, 71-83 (2004).
7. R.J. Holmes, "Sampling", in *An Introduction to Metal Balancing and Reconciliation*, Ed by R.D. Morrison. Julius Kruttschmitt Mineral Research Centre, Indooroopilly, Australia, pp. 141-170 (2008).
8. S. Brochot, "The application of sampling theory in metallurgical accounting process – Inventeo methodology implementation", in *Proceedings Fifth World Conference on Sampling and Blending*, Ed by M. Alfaro, E. Magri, F. Pitard. Gecamin, Santiago de Chile, pp. 185-193 (2011).
9. AMIRA P754, Metal accounting, code of practice and guidelines: Release 3 (2007).
10. R.D. Morrison and P.G. Gaylard, "Applying the AMIRA P754 code of practice for metal accounting", in *Proceedings MetPlant 2008*, AusIMM, Melbourne, Australia, pp. 3-22 (2008).
11. S. Brochot and M.V. Durance, "A New Approach to Metallurgical Accounting", in *Proceedings 11th Mill Operators' Conference*. AusIMM, Hobart, Tasmania, Australia, pp. 217-223 (2012).
12. Z. Xiao and A. Vien, "Limitations of variance analysis using propagation of variance", *Minerals Engineering*. 16, 455-462 (2003).
13. D. Hodouin and M.D. Everell, "A hierarchical procedure for adjustment and material balancing of mineral process data", *International Journal of Mineral Processing*. 7, 91-116 (1980).
14. J.A. Herbst, R.K. Mehta and W.T. Pate, "A hierarchical procedure for mass balance closure and parameter estimation: application to ball mill grinding", in *Proceedings XVI International Mineral Processing Congress*, Ed by K.S.E. Forsberg, Elsevier, Amsterdam, pp. 1719-1732 (1988).
15. J. Ragot, M. Darouach, D. Maquin and G. Bloch, *Validation de Données et Diagnostique*, Hermes, Paris (1990).
16. J. Ragot and D. Maquin, "Validation et réconciliation de données. Approche conventionnelle, difficultés et développements", *Les Techniques de l'Industrie Minérale, La SIM*, Paris. 29, 22-30 (2006).
17. P. Gy, *Sampling of Particulate Materials, Theory and Practice*. Elsevier, Amsterdam (1979).
18. F.F. Pitard, *Pierre Gy's Theory of Sampling and C.O. Ingamells' Poisson Process Approach, pathways to representative sampling and appropriate industrial standards*. Doctoral thesis, Aalborg University, Denmark (2009).
19. P. Minkkinen, "Practical application of sampling theory", *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 74, 85-94 (2004).
20. P. Minkkinen, "Estimation of variance components from the results of interlaboratory comparisons", *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 29, 263-270 (1995).
21. JCGM/WG 1, *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement*. BIPM, Paris (2008).
22. P. Minkkinen and K.H. Esbensen, "Multivariate variographic versus bilinear data modeling", *Journal of Chemometrics*. 28, 395-410 (2014).