

Применение согласования данных для улучшения оценки показателей процесса флотации

Мануэль Гонзалез, Caspeo Chili,
Сантьяго, Чили – m.gonzalez@caspeo.net; Моб: +56-9-5636-1547

Стефан Брошо, Caspeo,
ул. Авеню Клода Гиймен, 3, а/я 36009, 45060, Орлеан Седекс 2, Франция

Мари-Вероник Дюран, Caspeo,
ул. Авеню Клода Гиймен, 3, а/я 36009, 45060, Орлеан Седекс 2, Франция

АННОТАЦИЯ

Оценка процессов на комплексных флотационных фабриках обычно ограничивается подходом черного ящика. Как правило данный подход применяется из-за недостатка данных для учета различных этапов процесса. Это обычный выбор поскольку выполнение расчетов материального баланса с учетом циркуляционных нагрузок и нескольких металлов представляется сложной задачей. Основной проблемой такого подхода является потеря информации и, при использовании неподходящего метода расчета, отсутствие надлежащей оценки точности результатов.

Статистическое согласование данных является предпочтительным методом в металлургическом учете поскольку оно удовлетворяет одному из наиболее важных требований Кодекса AMIRA. При этом оно также может быть успешно использовано при оценке процессов комплексных флотационных фабрик, давая больше информации и улучшая точность результатов баланса масс. Кроме того, данный метод позволит инженерам лучше понимать процесс благодаря подробной модели фабрики и возможности расчета ключевых показателей эффективности по стадиям.

В рамках настоящей статьи сравниваются и обсуждаются результаты различных подходов к расчету баланса масс фабрики флотации полиметаллических руд. Статья также показывает, как, используя программное обеспечение для согласования данных, возможно построить более подробную модель завода, которая будет предоставлять больше информации и улучшать точность расчета баланса.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Согласование данных, контроль процессов, флотация, полиметаллическая руда

ВВЕДЕНИЕ

Баланс материалов является одной из наиболее важных задач обогатительной фабрики не только потому, что данные баланса используются для расчета основных KPI завода, но и потому, что появляются в корпоративных финансовых отчетах (AMIRA International, 2007). Эти две причины являются достаточно важными, чтобы вынудить инженеров и руководителей уделять пристальное внимание расчету материального баланса (Carrai et al., 2016).

Хотя сегодня как никогда просто реализовать правильное сведение комплексных материальных балансов (Guerney et al., 2005), горнорудная индустрия по-прежнему использует классические менее точные подходы. Наряду с тем, что, используя указанные подходы возможно посчитать материальный баланс, они обладают важными недостатками в части качества результатов расчета. При этом они просты в понимании, внедрении и использовании. К сожалению, эти факторы обычно являются значительно более важными чем истинная цель материального баланса: качество и содержательность результата.

Следующие разделы представят типовую постановку задачи расчета материального баланса в горнорудном производстве, два основных способа расчета и сравнение результатов, полученных в рамках применения каждого из них. Затем будет представлен пример, показывающий построение подробного материального баланса для целей контроля процессов.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ БАЗОВОГО СЕНАРИЯ

Базовый сценарий представлен флотационной фабрикой, производящей медный и цинковый концентраты. Рисунок 1 показывает обобщенную схему фабрики:

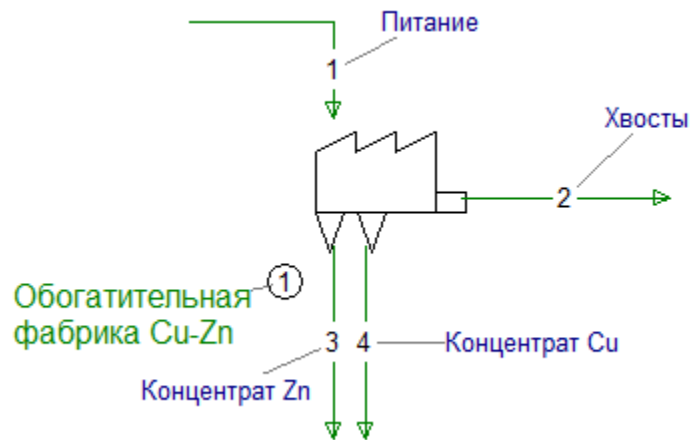


Рисунок 1. Обобщенная схема фабрики для обогащения меди и цинка

На обогатительных фабриках такого типа содержание металла обычно хорошо известно, при этом, с другой стороны, измеряется только расход питания. Инженеры металлургии ответственны за расчет массы как концентрата, так и хвостов.

Типовые доступные данные обобщены в Таблице 1:

Таблица 1. Общая масса и содержания металлов

Поток	Масса руды (т)	Содержание Cu (%)	Содержание Zn (%)	Содержание Au (ч/млн)
Питание	2501.53	2.05	2.18	1.32
Медный концентрат		18.23	7.83	5.52
Цинковый концентрат		5.11	48.28	4.36
Хвосты		0.84	0.43	0.68

Результаты материального баланса ОФ очень важны для горнорудной компании поскольку количество произведенного концентрата, а значит и произведенного металла, показывает выручку предприятия. По этой причине инженерам необходимо внедрять простой в использовании и исчерпывающий подход к расчету баланса, который может улучшить общий баланс материалов и снизить финансовые риски. Настоящая статья представляет и сравнивает наиболее распространенные методики: формулу трех продуктов и статистическое согласование данных.

ПОДХОДЫ К РАСЧЕТУ МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА: ФОРМУЛА ТРЕХ ПРОДУКТОВ

Формула трех продуктов является наиболее распространенной и простой в использовании методикой, способной решать задачи материального баланса, подобные той, что была представлена выше. Данная методика рассчитывает недостающие переменные путем решения системы уравнений, поэтому основным требованием является возможность написания числа уравнений, соответствующего числу недостающих переменных. В случае фабрики для обогащения меди и цинка, система уравнений может быть следующей:

$$\begin{cases} Q_F = Q_T + Q_C + Q_Z \\ Q_F \times Cu_F = Q_T \times Cu_T + Q_C \times Cu_C + Q_Z \times Cu_Z \\ Q_F \times Zn_F = Q_T \times Zn_T + Q_C \times Zn_C + Q_Z \times Zn_Z \end{cases} \quad (1)$$

где:

Q_F, Q_T, Q_C, Q_Z = общая масса твердого в питании, хвостах, медном концентрате и цинковом концентрате

Cu_F, Cu_T, Cu_C, Cu_Z = содержание меди в питании, хвостах, медном концентрате и цинковом концентрате

Zn_F, Zn_T, Zn_C, Zn_Z = содержание цинка в питании, хвостах, медном концентрате и цинковом концентрате

В зависимости от измеряемых металлов, для расчета материального баланса обогатительной фабрики могут быть использованы другие уравнения. Например, хотя это и рискованно в силу вовлечения показателей с более высокими погрешностями в баланс, также может быть использовано уравнение баланса золота.

На практике инженеры не решают эти уравнения напрямую. Широко распространены несколько расчетных методов, таких, как метод определителя или метод линейной оптимизации. Оба очень просты в понимании и внедрении в табличном программном

обеспечении. Метод определителя направлен на поиск недостающих масс путем использования определителей Системы уравнений 1. Метод линейной оптимизации позволяет рассчитать недостающие значения путем решения сокращенной системы из двух уравнений и двух неизвестных переменных с двумя ограничениями. Поскольку эти методы эквивалентны, получаемые результаты расчетов материального баланса также идентичны.

ПОДХОДЫ К РАСЧЕТУ МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА: СОГЛАСОВАНИЕ ДАННЫХ

Согласование данных является одним из наиболее продвинутых и хорошо зарекомендовавших себя в горнорудной индустрии подходов к расчету материальных балансов. Алгоритм рассчитывает набор оценочных значений, которые минимизируют целевую функцию в условиях ограничений, налагаемых уравнениями сохранения материала для руды и измеряемых металлов (Caspero, 2018). Следующие уравнения представляют целевую функцию к минимизации для фабрики для обогащения меди и цинка:

$$J(Y) = \sum_{i=1}^n J_i(Y_i) \quad (2)$$

$$J_i(Y_i) = \left(\frac{Q_i - \bar{Q}_i}{\sigma_i \times \bar{Q}_i} \right)^2 + \sum_{k=1}^n \left(\frac{X_{ik} - \bar{X}_{ik}}{\sigma_{ik} \times \bar{X}_{ik}} \right)^2 \quad (3)$$

где:

$J(Y)$ = целевая функция

i = индекс потоков

k = индекс металлов: медь, цинк и золото

Q = масса

X = содержание металла

σ = погрешность измерения

Ограничения сохранения материала следующие:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n M_i Q_i = 0 \\ \sum_{i=1}^n M_i Q_i X_{ik} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

где $M_i = 1$ если поток i является входящим потоком, и -1 , если поток i является выходящим.

Алгоритм также учитывает погрешность измерения σ , ассоциированную с каждой переменной (Brochet, 2011), гарантируя, что расчетные значения являются наиболее вероятными. Дополнительно, алгоритм также рассчитывает погрешности, ассоциированные с рассчитываемыми оценочными значениями, которые всегда ниже исходных погрешностей измерения. Рисунок 2 обобщает входящие и выходящие параметры алгоритма согласования данных:



Рисунок 2. Входящие и выходящие параметры алгоритма согласования данных

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА

Два представленных выше подхода могут быть использованы для расчета баланса материалов фабрики для обогащения меди и цинка.

Формула трех продуктов используется для расчета масс медного концентрата, цинкового концентрата и хвостов. Для вычисления соответствующих значений формируется система из трех уравнений материального баланса (1): для общей массы, для массы меди и массы цинка. Таблица 2 показывает результаты применения формулы трех продуктов:

Таблица 2. Результаты применения формулы трех продуктов

Поток	Масса руды (т)	Масса Cu (т)	Масса Zn (т)	Масса Au (кг)
Питание	2501.53	51.28	54.53	3.30
Концентрат Cu	157.58	28.73	12.34	0.87
Концентрат Zn	67.12	3.43	32.40	0.29
Хвосты	2276.84	19.13	9.79	1.55
Баланс (Вход-Выход)	0	0	0	0.59

На первый взгляд все выглядит хорошо, но если мы попробуем проверить материальный баланс золота, то обнаружим, что он не согласуется. Это один из недостатков методики: она не захватывает избыточные данные. Это очень важное следствие т. к. золото в обоих концентратах является оплачиваемым металлом, поэтому нам нужна наилучшая возможная оценка показателя содержания золота, чтобы знать, сколько компания заработает на нем, и чтобы получить лучшую оценку стоимости.

Другие важные особенности, которые необходимо принимать во внимание при использовании этой методики, это то, что она не учитывает погрешности измерения, не может корректировать измеренные значения параметров соответствующим образом, и наконец, что не менее важно, она применима только к простым схемам (1 узел).

Расчет согласования данных был выполнен в VILCO, программном пакете, созданном институтом BRGM во Франции в начале 80х годов. В наши дни VILCO развивается и обновляется компанией Casreo и интенсивно используется горнорудными компаниями по всему миру.

В сравнении с формулой трех продуктов, процедура согласования данных может обработать больше параметров, чем минимально необходимое их количество, и учитывает погрешности измерения. Для ускорения работы алгоритма согласования данных, при его инициализации неизвестным значениям масс выходящих потоков присваиваются значения, полученные путем расчета по формуле трех выходов. Хотя в такой ситуации в целом возможно использовать даже грубые оценки.

Данные, поступающие в работу алгоритма согласования данных, в том числе показатели содержания золота, приведены в Таблице 1. Ассоциированные погрешности составляют 10% для измеренных масс, 100% для расчетных масс (эта погрешность выбрана произвольно большой для допущения любых согласованных значений соответствующих показателей), 10% для содержаний меди и цинка, 20% для содержаний золота. Результаты расчета материального баланса приведены в Таблице 3:

Таблица 3. Результаты расчета материального баланса путем согласования данных

Поток	Масса руды (т)	Содержание Cu (%)	Содержание Zn (%)	Содержание Au (ч/млн)
Питание	2500.3	2.08	2.19	1.15
Медный концентрат	162.9	18.09	7.38	5.72
Цинковый концентрат	68.2	5.11	48.22	4.41
Хвосты	2269.2	0.84	0.43	0.72

В отличие от расчета по формуле трех продуктов, при использовании подхода согласования данных общие и частичные материальные балансы выполняются, в результате мы получаем хорошую оценку производства золота. И это только первое улучшение в сравнении с предыдущим подходом. Второе заключается в количественном выражении увеличения точности согласованных данных. Алгоритм согласования данных VILCO рассчитывает наиболее вероятные значения каждой переменной, т. е. ассоциированные погрешности снижаются в силу наличия избыточного объема данных. Расчетные погрешности приведены в Таблице 4:

Таблица 4. Расчетные погрешности, ассоциированные с расчетными значениями

Поток	Расчетная масса руды, погрешность (%)	Расчетное содержание Cu, погрешность (%)	Расчетное содержание Zn, погрешность (%)	Расчетное содержание Au, погрешность (%)
Питание	9.86	9.52	9.82	11.88
Медный концентрат	23.89	9.96	9.99	18.78
Цинковый концентрат	23.69	10.01	9.96	19.71
Хвосты	9.98	10.00	9.99	17.27

Основное улучшение в части точности наблюдается для содержания золота в питании, что важно из финансовых соображений. Дополнительно, в рамках такого подхода погрешность рассчитывается и для расчетных значений массы, которые могут быть рассмотрены как измерения.

РАСЧЕТ ПОДРОБНОГО МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОГЛАСОВАНИЯ ДАННЫХ

Как мы увидели, согласование данных является простым в использовании инструментом, который помогает улучшить наши материальные балансы. Поскольку на фабрике невозможно измерить все потоки, применение согласования данных требует проведения некоторых расчетов для получения всех данных, недостающих для запуска алгоритма. Исполнять такие расчеты быстро и просто, поэтому наша модель может быть расширена для принятия во внимание большего числа стадий процесса, таких, как основная, перечистная и контрольная флотации.

Целью является построение подробной модели баланса материалов фабрики для обогащения меди и цинка, которая бы включала все (или почти все) доступные оперативные данные. Рисунок 3 показывает полную схему фабрики и местоположение контрольных точек.

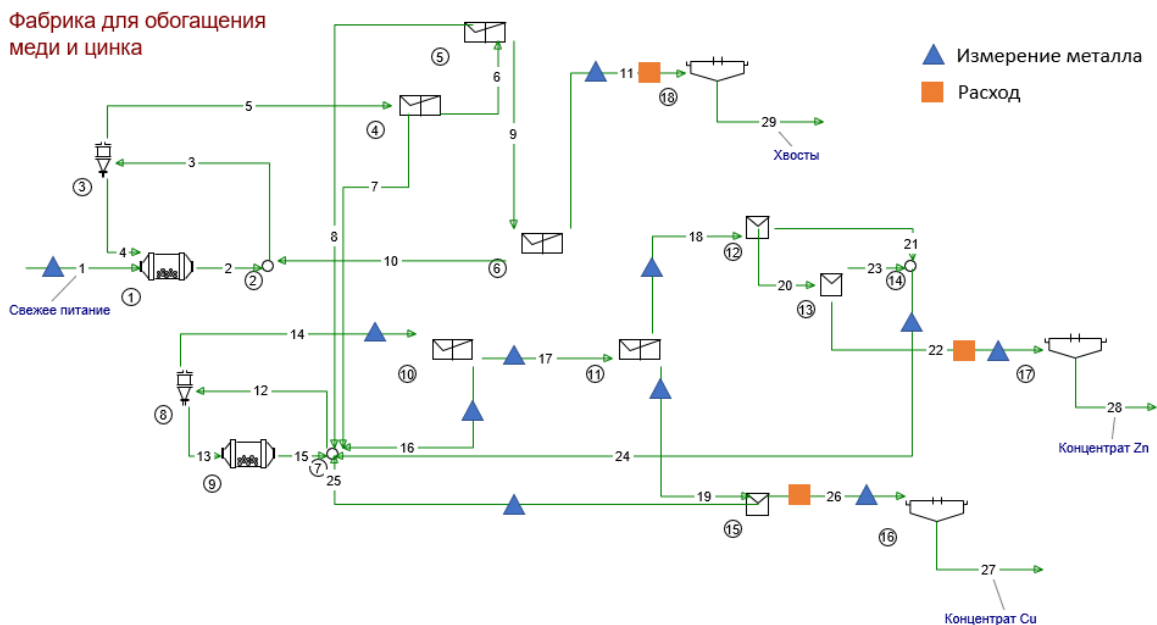


Рисунок 3. Подробная схема фабрики

Первым шагом является построение упрощенной, но максимально подробной схемы балансовых узлов, такой, как представлена на рисунке 4:

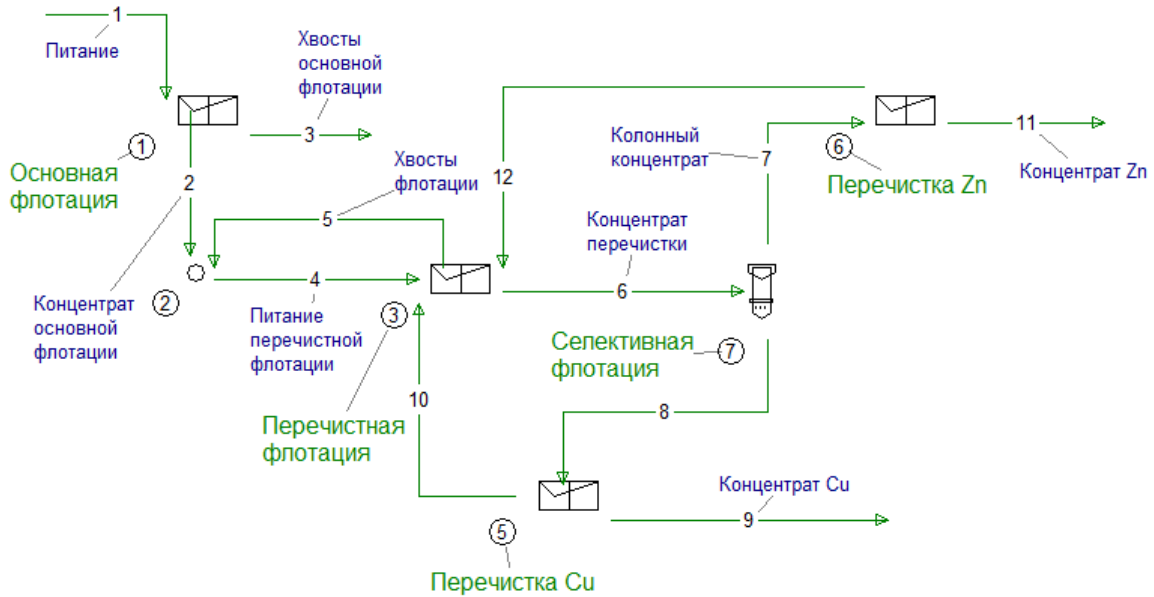


Рисунок 4. Упрощенная схема фабрики, использованная для построения модели баланса материалов

Хотя новая схема проще исходной, не все данные, необходимые для запуска алгоритма согласования данных VIICO, доступны. Пример расчета недостающих значений показан на рисунке 5. Желтые ячейки отражают исходные значения, посчитанные по формуле двух продуктов:

1	Питание			
Руда				
Количество	2045	т		20
Металл	Содержание	Единица		Погрешность (%)
Cu	2,23	%		10
Zn	2,03	%		10
Сумма	4,26	%		
2	Концентрат основной флотации			
Руда				
Количество	176,75	т		20
Металл	Содержание	Единица		Погрешность (%)
Cu	16,2006	%		20
Zn	14,4801	%		20
Сумма	30,6807	%		

Рисунок 5. Пример расчета недостающих значений.

После инициализации (получения) всех данных, возможно выполнить согласование данных, результаты которого отражены на рисунке 6.

Сравнительный Отчет

Файл Правка Ячейка Поток

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
30		Поток №3 Хвосты основной флотации															
31																	
32		Фаза: Руда															
33																	
34				Расчетные значения	Расчетные погрешности	Экспериментальные значения	Экспериментальные погрешности	Абсолютное отклонение	Относительное отклонение (%)								
35		Количество	1758,4525 т	±	6,8250956 %	1895,3 т	±	10 %	-136,84747	-7,4907905							
36																	
37		Металл	Содержание	Погрешность	Содержание	Погрешность											
38		Cu	0,67620668 %	±	9,5002738 %	0,66 %	±	10 %	0,016206682	2,4257747							
39		Zn	0,43868087 %	±	9,6730627 %	0,43 %	±	10 %	0,0086808742	1,9986337							
40																	
41		Поток №4 Питание перерывной флотации															
42																	
43		Фаза: Руда															
44																	
45				Расчетные значения	Расчетные погрешности	Экспериментальные значения	Экспериментальные погрешности	Абсолютное отклонение	Относительное отклонение (%)								
46		Количество	390,66585 т	±	4,7952206 %	390,21 т	±	10 %	0,45585032	0,1167536							
47																	
48		Металл	Содержание	Погрешность	Содержание	Погрешность											
49		Cu	9,5075821 %	±	4,7426922 %	9,8 %	±	10 %	-0,29241793	-3,0290476							
50		Zn	7,6700227 %	±	5,5105847 %	7,21 %	±	10 %	0,46002265	6,1830908							
51																	
52																	
53		Поток №5 Хвосты флотации															
54																	

Рисунок 6. Сравнительный отчет по материальному балансу в BILCO

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Материальный баланс играет очень важную роль в горнорудной индустрии, и металлурги должны уделять ему пристальное внимание. В зависимости от доступных данных и поставленной цели, для сведения баланса возможно применять различные подходы. Некоторые из них, такие, как формула двух или трех выходов, являются простыми в использовании и быстрыми во внедрении, но не подходят для расчета больших и комплексных материальных балансов, а качество результатов является неудовлетворительным. С другой стороны, подход согласования данных является более продвинутой методикой, предлагающей высокую гибкость и обеспечивающей качество расчетных данных. Совмещенное с правильной методологией, согласование данных доказало свою состоятельность как инструмент, способный автоматизировать и упростить расчет комплексных материальных балансов, включающих несколько балансовых узлов и металлов, принимающий во внимание избыточность данных. Такой подход представляет инженерам хорошую возможность улучшить знание не только общей производительности фабрики, но также и производительности отдельных секций процесса, например, основной или перерывной флотаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

AMIRA International (2007) *Metal Accounting: Code of Practice and guidelines*, Release 3, AMIRA International Africa.

Brochot, S. (2011) 'The application of sampling theory in metallurgical accounting process – Invenio methodology implementation', *Proceedings Fifth World Conference on Sampling and Blending*, M. Alfaro, E. Magri, F. Pitard, Santiago de Chile, pp. 185—193.

Cappai, L., Gonzalez, M., Brochot, S., Vix, P., (2016) 'Metal accounting, the cores responsibility of process engineers', *Proceedings Twelfth International Mineral Processing Congress*, C. Velasquez, Santiago, Chile, pp. 313—326.

Caspeo (2018) *BILCO User's Guide*, Caspeo, France

Guerney, P., Dungleison, M., and Cameron, P.M. (2005) 'Leveraging accuracy and precision — Multi-phase mass balancing and reconciliation as a tool for quality data management', *Proceedings Second World Conference on Sampling and Blending*, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne, pp. 121—125.