

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СОГЛАСОВАНИЯ ДАННЫХ МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА В НЕФТЕПЕРЕРАБОТКЕ

DATA RECONCILIATION EFFICIENCY FOR REFINERY MATERIAL BALANCE

**V. Kuvykin
R. Balashov
R. Ibulaev
M. Meleshkevich**

Summary. The article deals with a problem of refinery material balance data reconciliation. A new methodology has been developed to estimate automated data reconciliation system implementation efficiency. We propose to use simulation modeling in the analysis of material balance reconciliation. In the article were presented the results of calculating the efficiency by two different material balance reconciliation methods for the crude oil distillation unit.

Keywords: mathematical modeling, nonlinear programming, automation in industry, data reconciliation, material balance, information systems integration, refinery.

Кувыкин Вячеслав Иванович

Д.ф.-м.н., профессор, Нижегородский государственный университет им. Лобачевского (национальный исследовательский университет); Главный специалист ООО «ЛУКОЙЛ — Инженерные навыки и компетенции», Нижний Новгород
kuvykin@itmm.unn.ru

Балашов Роман Дмитриевич

Начальник Центра ООО «ЛУКОЙЛ — Инженерные навыки и компетенции», Нижний Новгород
Roman.Balashov@lukoil.com

Ибулаев Роберт Георгиевич

К.т.н., начальник лаборатории, ООО «ЛУКОЙЛ — Инженерные навыки и компетенции», Нижний Новгород
Robert.Ibulaev@lukoil.com

Мелешкевич Михаил Александрович

Экономист, ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез», Кстово
meleshkevichma@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрена задача согласования данных материального баланса нефтеперерабатывающего завода. Разработана методология оценки эффективности внедрения автоматизированных систем согласования данных для различных установок предприятия. Построена имитационная модель сведения материального баланса для анализа процесса согласования данных. Приведены численные расчеты эффективности сведения материального баланса двумя различными способами для установки первичной переработки нефти.

Ключевые слова: математическое моделирование, нелинейное программирование, автоматизация производства, согласование данных, материальный баланс, интеграция информационных систем, нефтепереработка.

Развитие киберфизических систем в современном мире требует совершенствования технологии анализа и согласования данных, поскольку успешная работа таких систем определяется во многом именно качеством обработки информации [1]. Процесс согласования данных становится основной проблемой, поскольку он играет важную роль в проверке материальных балансов на наличие грубых ошибок измерения [2]. Он служит для актуализации параметров математической модели оптимального планирования на основе обратной связи по измерениям на нефтеперерабатывающем заводе (НПЗ) [3, 4].

Цифровизация производства позволила заменить электронные таблицы на стандартизированные ком-

пьютерные программы, которые позволяют получить взвешенные управленческие решения на основе достоверных данных. Результатом стало появление мощных и удобных пакетов для анализа и согласования данных измерительных систем, таких как I-DRMS (IndaSoft) [5], Aspen Operations Reconciliation and Accounting (AspenTech) [6], Production Balance (Honeywell) [7], ROMeo Material Balance (AVEVA), [8] и др. Такие IT-системы используют технологию DR (data reconciliation), которая позволяет извлекать достоверную информацию о состоянии производственных процессов из необработанных данных измерений [2].

В мировой практике можно выделить два основных подхода по сведению материального баланса: эвристи-

ческий и кибернетический. Эвристический способ основан на использовании специалистами по сведению баланса своего предыдущего производственного опыта. Полученные решения имеют хорошую интерпретацию и интуитивно понятны пользователям. При сведении баланса применяются сложные и взаимосвязанные электронные таблицы. Однако, этот метод слабо формализуем, в значительной степени зависит от человеческого фактора, что приводит к проблемам при передаче знаний и автоматизации процесса [9]. Отметим, что интуитивные решения, не подтвержденные расчетом, существенно снижают эффективность бизнеса.

Другим способом сведения баланса является кибернетический, который опирается на данные систем управления различного уровня. Он основан на технологии DR, статистическом анализе данных и тщательном расчете с применением компьютерных технологий. В этом случае необходима более серьезная квалификация в области анализа данных и математического моделирования, совместная работа специалистов различного профиля по интеграции систем согласования данных в единую информационную систему предприятия. Таким образом, увеличивается нагрузка на персонал предприятия. В работе [1] приводится достойный сожаления случай по автоматизации расчетов на основе согласованных данных на одном из НПЗ. Чтобы удовлетворить корпоративный показатель эффективности, связанный с численностью сотрудников завода, менеджеры завода прекратили работу по согласованию данных. Авторы работы [1] полагают, что тема согласования данных требует гораздо большего внимания при построении современной киберфизической системы предприятия.

Широкое внедрение автоматических систем согласования данных в значительной степени тормозится слабой интерпретацией результатов и отсутствием четкой и понятной оценки получаемых эффектов. Актуальной задачей является повышение точности сведения материального баланса и расчет эффективности применения информационных систем согласования данных.

Целью работы является разработка методологии оценки эффективности автоматизированных систем согласования данных материального баланса для промышленных установок.

Математическая модель согласования данных материального баланса

В данной работе воспользуемся математической моделью стационарного процесса [2,10]:

$$Ax = 0, \quad (1)$$

где x — вектор переменных размерности k , описывающий массу материальных потоков предприятия, продукцию в резервуарах, расход топлива и потери, A — матрица балансовых уравнений размерности $m \times k$ (элементы матрицы $a_{ij}=1$ для входящих потоков и $a_{ij}=-1$ — для выходящих, $a_{ij}=0$ — если поток не участвует в массовом балансе). Обозначим вектор измерений z и рассмотрим задачу нелинейного программирования с целевой функцией $I(x)$ [2]

$$\min_x I(x), \quad I(x) = \sum_{i=1}^k \left(\frac{x_i - z_i}{\sigma_i} \right)^2. \quad (2)$$

Здесь σ_i — стандартное отклонение i -го измерения.

Решение задачи оптимизации (1) — (2) называют согласованными значениями. Сумма квадратов отклонений измеренных и согласованных значений (2) с учетом дисперсии (более точные наблюдения входят с большим весом, более грубые — с меньшим) является минимальной.

Имитационное моделирование согласования данных материального баланса

Покажем преимущество технологии согласования данных на примере одной из установок НПЗ — первичной переработки нефти АВТ (атмосферно-вакуумной трубчатки). Установки АВТ играют в нефтепереработке большую роль, поскольку от показателей их работы во многом зависит эффективность последующих процессов на НПЗ [11].

Сырая нефть представляет собой сложную смесь углеводородов. Установка АВТ — это первичный процесс переработки нефти, при котором нефть разделяется на углеводородный газ, бензиновую, керосиновую и дизельную фракции углеводородов, вакуумные погоны и гудрон. Разделение нефти на нефтяные фракции происходит в ректификационных колоннах (атмосферной и вакуумной). Выделение фракций углеводородов происходит по диапазону их температур выкипания. Углеводородные газы имеют наименьшую температуру, а вакуумные погоны имеют наибольшую температуру выкипания. Гудрон АВТ не выкипает и является остатком вакуумной колонны.

Часть продуктов установки АВТ может использоваться как самостоятельные товарные продукты, другим необходима дальнейшая переработка на установках НПЗ для получения требуемых товарных характеристик. Количество и качество производимых на установке АВТ

Таблица 1

<i>i</i>	Продукты	баланс	истинные	измер.	соглас.	откл.
		%	т.т	т.т	т.т	т.т
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)=(6)-(5)
0	Нефть	100,0	10,000	10,314	9,890	-0,424
1	Газ	1,0	0,100	0,101	0,101	0,000
2	Бензиновые фракции	18,6	1,860	1,883	1,897	0,014
3	Керосин	9,8	0,980	0,892	0,895	0,003
4	Дизельное топливо	17,0	1,700	1,641	1,651	0,010
5	Вакуумные погоны	17,8	1,780	1,805	1,818	0,013
6	Гудрон	35,0	3,500	3,403	3,449	0,046
7	Потери	0,8	0,080	0,079	0,079	0,000
	Итого выработка	100,0	10,000	9,804	9,890	0,086
	Дебаланс	0,0	0,000	-0,512	0,000	0,512

фракций может изменяться в широком диапазоне в зависимости от содержания этих фракций в нефти и требуемой продуктовой корзины НПЗ.

Типичный материальный баланс для нефти ромашкинского месторождения, приведен в работе [12] и представлен в табл. 1 (столбец 3). В столбце 4 табл. 1 показана выработка продукции для суточного объема переработки 10 000 тонн.

Важнейшим показателем, характеризующим работу НПЗ и его конкурентоспособность, является объем переработки и выход светлых нефтепродуктов [13]. Под выходом светлых понимают отношение общего количества произведенных бензинов, дизельных топлив и их фракций, топлива для реактивных двигателей, судового маловязкого и печного топлив к объему переработанного нефтяного сырья (в процентах от перерабатываемой нефти) [14]. В приведенном балансе табл. 1 выход светлых составляет 45,4%.

Рассмотрим изменение точности расчета переработки нефти и производства нефтепродуктов для измеренных и согласованных значений. Распространенной характеристикой точности измерения является стандартное отклонение [15]. В дальнейшем стандартное отклонение используется как характеристика точности измерений.

Будем предполагать нормальный закон распределения $N(\mu_i, \sigma_i)$ ошибок измерительных систем массы с математическим ожиданием μ_i и стандартным отклонением σ_i для i -го продукта ($i=0, \dots, 7$) табл. 1. Математическое ожидание примем равным истинной массе. Для

расчетов предположим, что стандартное отклонение $\sigma_i = 0,01\mu_i$.

Построена имитационная модель согласования данных (ИМСД). Написана программа для имитационного моделирования измерений на языке Python, которая позволяет моделировать процессы измерений массы продуктов и расчет согласованных значений в задаче (1) — (2), визуализировать результаты расчета.

В табл. 1 в столбце 5 представлена одна из реализаций случайных величин, распределённых по нормальному закону. Значение дебаланса d (разность выработки нефтепродуктов и нефти) в этом случае составило $d = -0,512$ т.т. При согласовании данных материального баланса (столбец 6), дебаланс обращается в ноль $d = 0$. При этом измерения корректируются и разница между согласованными и измеренными значениями приведена в столбце 7.

Сравним расчет массы нефти, который получается при моделировании по результатам измерений, со значениями после процедуры согласования данных материального баланса для выборки из $n = 365$ реализаций случайных величин. Выборочное стандартное отклонение $s_I = 0,043$ т для расчёта по согласованным значениям существенно меньше, чем для измеренных значений $s_0 = 0,097$ т, т.е. точность расчета выше.

Таким образом, имитационная модель согласования данных (ИМСД) наглядно показывает увеличение точности расчета переработки нефти и выработки нефтепродуктов на установках первичной переработки нефти при использовании технологии DR. Отметим,

что ИМСД может использоваться для настройки параметров оптимизационной задачи согласования данных (1) — (2) для установок НПЗ.

Автоматизированная система согласования данных нефтеперерабатывающего завода

Работа предприятий нефтепереработки и нефтехимии характеризуется значительными колебаниями свойств сырья, разнообразием технологических режимов. Такие серьезные изменения затрудняют факторный анализ причин изменения показателей эффективности.

В работе предлагается для оценки эффективности методология сравнения эвристического и кибернетического (СЭК) способов сведения материального баланса. В этом случае формируется набор измеренных данных и используются два метода обработки данных, затем результаты сравниваются между собой. Отметим, что аналогичная методология была предложена для расчета эффективности систем оптимального планирования в работе [16]. Один из способов основан на прикладных эвристических алгоритмах и выполняется профессиональными специалистами, а другой, кибернетический, опирается на данные систем управления разного уровня с применением математического моделирования и IT-технологий.

Для решения задачи согласования данных материального баланса нефтеперерабатывающего предприятия применялась программа Production Balance (Honeywell) [7]. Для решения задачи оптимального планирования производства использовалась система RPMS (Honeywell). Основные принципы моделирования нефтехимических кластеров RPMS описаны в статье [17]. Отклонение согласованных значений от оптимальных плановых дает возможность, с одной стороны, актуализировать модель планирования производства [18], с другой — детектировать грубые ошибки измерения при существенных отклонениях выходов продукции.

Для интеграции и анализа данных различных систем управления, таких, как распределенная система управления DCS (Distributed Control System), система управления производственными процессами MES (Manufacturing Execution System), оптимального планирования APS (Advanced Planning and Scheduling), разработана собственная программа SCALPELLUM [19]. Программа позволяет осуществить мониторинг процессов переработки углеводородного сырья, актуализацию моделей оптимального планирования по результатам сведения материального баланса и служила источником измеренных и согласованных данных.

Для сравнения рассмотрены данные по установке первичной переработки нефти АВТ с мощностью по переработке нефти 4,2 млн. т в год. Ключевым показателем эффективности методов сведения баланса по установке принято значение выхода светлых нефтепродуктов. Сравнивались выборочные средние значения, рассчитанные на основании эвристического способа и кибернетического с применением системы автоматизированного сведения баланса. Выборочные средние отличались, их расхождения, как правило, невелики по сравнению со значениями выхода светлых.

Использованы наборы данных, полученные во время внедрения автоматизированной системы сведения материального баланса, когда одновременно применялись оба способа. Статистический анализ имеющихся по установке первичной переработки нефти данных показал, что выход светлых нефтепродуктов по согласованным значениям выше. Отклонение средних значений двух выборок (ручного и автоматизированного) по выходу светлых нефтепродуктов составило 0,7%.

Для ответа на вопрос, вызвано ли обнаруженное расхождение средних неизбежными случайными ошибками сведения баланса или оно обусловлено некоторыми закономерностями, проведена оценка значимости различия выборочных средних, т.е. проверялась гипотеза H_0 с надежностью 0,95 о равенстве средних значений выхода светлых для двух рассмотренных выше способов сведения баланса по установке. Сравнение опиралось на методы математической статистики [20]. Гипотеза H_0 отвергнута.

Более точные согласованные данные материального баланса позволяют настроить работу систем оптимизации. Во-первых, работа систем автоматического управления, как известно, существенно зависит от точности измерений. Оптимизация работы технологического оборудования может быть достигнута применением систем усовершенствованного управления процессами (APC — Advanced Process Control) и систем управления в реальном времени (RTO — Real-time optimization). Повышение точности измерений существенно повысило эффективность работы систем оптимизации [4,21]. Во-вторых, согласованные данные дают возможность скорректировать модель оптимального планирования и, тем самым, повысить точность планирования, реализуемость месячных и календарных планов.

Для различных НПЗ составляющие экономической эффективности по установкам, безусловно, отличаются, но они могут быть рассчитаны на основе предлагаемой методологии СЭК с использованием имеющейся на предприятии фактической информации. Сегодня продвижение технологии согласования данных — это,

по сути, конкуренция за эффективность производства и капитализацию компаний.

Заключение

В условиях жесткой конкуренции управленческие решения должны приниматься на основе тщательно-го анализа имеющихся данных измерительных систем, быть математически обоснованными и экономически эффективными. Для повышения достоверности данных в мировой практике применяется технология согласования данных.

Для количественной оценки точности расчетов выхода светлых нефтепродуктов, который является одним из ключевых показателей эффективности в нефтепереработке, предложено использовать имитационное моделирование согласования данных (ИМСД). Показано, что выборочное стандартное отклонение ключевых

показателей эффективности, рассчитанное на основе согласованных данных, меньше, чем для измеренных, поэтому в практических расчетах следует полагаться на согласованные значения.

Предложенная методология сравнения эвристического и кибернетического (СЭК) способов сведения материального баланса применялась для оценки эффекта от внедрения автоматизированной системы сведения баланса для установок нефтеперерабатывающего завода. Проведена оценка эффекта от внедрения систем согласования данных для установки первичной переработки нефти.

Методика СЭК и интерпретация получаемых результатов на основе имитационного моделирования, несомненно, могут быть использованы в других отраслях промышленности для повышения эффективности производства и построения киберфизических систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Joly M., Odloak D., Miyake Mario Y. et al. Refinery production scheduling toward Industry 4.0. 2018. *Front. Eng.*, 5(2), p. 202–213.
2. Narasimhan S., Jordache C. Data reconciliation and gross error detection: an intelligent use of process data. Houston: Gulf Publishing Company, 2000. 406p.
3. Кувькин В.И., Логунов П.Л. Согласования данных материального баланса нефтеперерабатывающего завода // *Автоматизация и информатизация ТЭК*. 2022. № 2(583). С. 41–48. DOI: 10.33285/2782–604X-2022–2(583)-41–48.
4. Valentine, J., Videla R. Case study for a high-performing refinery loss control program // *Hydrocarbon processing*. 2019. N5. URL: <https://www.hydrocarbonprocessing.com/magazine/2019/may-2019/process-optimization/case-study-for-a-high-performing-refinery-loss-control-program> (дата обращения: 11.10.2022).
5. Data Reconciliation Management System — I-DRMS // URL: <https://indusoft.ru/en/products/indusoft/> (дата обращения: 11.10.2022).
6. Aspen Operations Reconciliation and Accounting // URL: <https://www.aspentech.com/en/products/msc/aspen-operations-reconciliation-and-accounting> (дата обращения: 11.10.2022).
7. Production Balance PIN — Honeywell Process Solutions. URL: <https://paperzz.com/doc/6820600/production-balance-pin—honeywell-process-solutions>. Last accessed 11 Oct 2021 (дата обращения: 11.10.2022).
8. ROMeO Material Balance // URL: <https://www.utitech.com.tw/download/DataSheet/AVEVA/O&O/AVEVA%20Proces%20Optimization/%E7%89%A9%E6%96%99%E5%B9%B3%E8%A1%A1.pdf> (дата обращения: 11.10.2022).
9. Кувькин В.И. Использование моделей бизнес-процессов НПЗ в системах планирования и учёта // *Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний*. 2013. № 7. С. 47–48.
10. Camara M.M., Soares R.M. et al. Numerical Aspects of Data Reconciliation in Industrial Applications // *MDPI Processes*. 2017. V.5. N.56. 38 p. DOI:10.3390/pr5040056i.
11. Подкаменный Ю.А., Бебихов Ю.В., Семёнов А.С., Якушев И.А. Оптимизация системы управления процессом первичной переработки нефти в ректификационной колонне // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки*. 2022. № 5. С. 102–112.
12. Технология переработки нефти. В 2-х частях. Часть первая. Первичная переработка нефти /Под ред. О.Ф. Глаголевой и В.М. Капустина. М.: Химия, Колос, 2005. 400 с.
13. Тьртов Е., Демидова Е. Российская нефтепереработка: выживут сильнейшие // *Энергетическая политика*. 2021. № 7 (161). С. 30–47.
14. ЛУКОЙЛ. Справочник аналитика 2010 // URL: https://lukoil.ru/InvestorAndShareholderCenter/ReportsAndPresentations/AnnualReports_info/ArchiveDataBooks1999–2009?ysclid=19r5id0a6k295874802 (дата обращения: 11.10.2022).
15. Колемаев В.А., Калинина В.Н. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: ИНФРА-М, 2000. 302 с.
16. Кувькин В.И. Организация автоматизированных систем планирования и материального баланса // *Автоматизация в промышленности*. 2014. № 8. С. 29–33.
17. Хохлов А.С., Мишутин Д.Ю., Бородин П.Е. Оптимизационные инструменты моделирования нефтехимических кластеров // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки*. 2019. № 03–2. С. 136–143.
18. Кувькин В.И., Брюханов М.В., Кувькина Е.В., Пискунов И.В., Сычев А.Г. Актуализация расчёта вязкости смесей тёмных нефтепродуктов в системе производственного планирования НПЗ. // *Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний*. 2017. № 9. С. 29–35.

19. Кувыкин В.И., Матвеев А.Е., Мелешкевич М.А., Шишмарева Е.В. SCALPELLUM // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU2015662513, 27.11.2015. Заявка № 2015619801 от 13.10.2015.
20. Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Анализ данных на компьютере. /Под ред. В.Э. Фигурнова М.: ИНФРА–М, 2002. 528 с.
21. Кувыкин В.И., Кувыкина Е.В., Матвеев А.Е., Сычев А.Г. Повышение эффективности производства при использовании системы согласования материального баланса // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 4. С. 36–40. DOI: 10.17513/snt.37488.

© Кувыкин Вячеслав Иванович (kuyukin@itmm.unn.ru), Балашов Роман Дмитриевич (Roman.Balashov@lukoil.com),
Ибулаев Роберт Георгиевич (Robert.Ibulaev@lukoil.com), Мелешкевич Михаил Александрович (meleshkevichma@mail.ru).
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»



Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского