УДК 665.7:004.9

Синодзаки Анастасия, магистрант
(ДВФУ, г. Владивосток)
Коробейников Илья Алексеевич, магистрант
(ДВФУ, г. Владивосток)
Шут Михаил Сергеевич, бакалавр
(ДВФУ, г. Владивосток)
Морозов Алексей Андреевич, старший преподаватель
(ДВФУ, г. Владивосток)

Anastasia Shinozaki, Master’s student
(FEFU, Vladivostok)
Ilya A. Korobeinikov, Master’s student
(FEFU, Vladivostok)
Mikhail S. Shut, bachelor's degree graduate
(FEFU, Vladivostok)
Alexey A. Morozov, Senior Lecturer
(FEFU, Vladivostok)

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА НЕФТЕПРОДУКТОВ НА НЕФТЕБАЗЕ

AUTOMATED CONTROL OF PETROLEUM PRODUCT MASS BALANCE AT AN OIL DEPOT

Аннотация: Разработан модуль контроля баланса нефтепродуктов. На 150 модельных сменах проверены пять сценариев. Контроль записей устраняет влияние точных дублей и отделяет неполноту данных от небаланса. Порог принят иллюстративно; промышленная применимость не установлена.

Abstract: A petroleum product mass-balance control module was developed. Five scenarios were evaluated across 150 model shifts. Record checks remove exact duplicates and distinguish incomplete data from imbalance. The threshold is illustrative; industrial applicability has not been established.

Введение

При хранении и перевалке нефтепродуктов необходимо согласовывать сведения о поступлении, отпуске и остатках. Автоматизация товарного учета представляет прикладную задачу цифровизации нефтяной отрасли. Например, «Роснефть» сообщает о внедрении автоматизированных измерений массы, плотности, давления и температуры при отгрузке топлива на Сызранском НПЗ [1]. Этот пример подтверждает отраслевую востребованность задачи, но не является источником данных настоящего эксперимента.

Цифровой расчет остатка полезен только при понятном качестве исходных записей. Пропуск отпуска или повторное внесение поступления меняет расчетный баланс даже при отсутствии фактического изменения запасов. При этом расхождение с измеренным остатком может иметь и метрологические причины. Неопределенность является характеристикой результата измерения и требует отдельного рассмотрения [2].

Цель работы — реализовать модуль, который сопоставляет расчетный и измеренный остатки нефтепродукта и различает состояния «в пределах порога», «небаланс» и «недостаточно данных». Исследовательский вопрос: как предварительная проверка полноты и дубликатов изменяет результат того же балансового расчета при типовых ошибках учета?

Объект и принятые допущения

Рассматривается один условный резервуар с одним видом нефтепродукта за расчетную смену. Известны начальная масса, документы поступления и отпуска, а также измеренная конечная масса. Все количества уже выражены в тоннах и относятся к одним границам учета. Пересчет уровня, объема, плотности и температуры в массу не моделируется.

Внутренние перекачки между резервуарами, масса в трубопроводах, подтоварная вода, естественная убыль и изменение состава продукта не включены. Для реальной нефтебазы эти составляющие необходимо учитывать по принятой схеме измерений. Упрощение позволяет отдельно исследовать логику обработки записей, не приписывая ей свойства промышленной системы.

Наличие небаланса означает основание для проверки документов и измерений. Оно не устанавливает утечку, хищение или неисправность резервуара. В зарубежной практике оценка методов обнаружения утечек требует специальных процедур испытаний [3]; приведенный модельный эксперимент такую оценку не заменяет.

Методика автоматизированного контроля

Расчетная конечная масса определяется по начальному остатку и зарегистрированным потокам. Балансовое расхождение имеет знак: положительное значение означает, что расчетный остаток больше измеренного.

$$M_{\mathrm{r}} = M_0 + M_{\mathrm{in}} - M_{\mathrm{out}} \quad (1)$$

$$\Delta M = M_{\mathrm{r}} - M_1 \quad (2)$$

Здесь M_0 — начальная масса; M_{in} и M_{out} — суммарные массы поступления и отпуска; M_r — расчетная конечная масса; M_1 — измеренная конечная масса. Все величины даны в тоннах. Для полных и согласованных записей срабатывание определяется условием:

$$|\Delta M| > \tau \quad (3)$$

В основном расчете $\tau = 0{,}5$ т. Это заранее заданный иллюстративный параметр, а не норматив допустимых потерь, паспортная погрешность или метрологически обоснованная граница. В промышленном применении порог необходимо выбирать с учетом неопределенности измерений, состава операций и последствий ошибочного решения [2].

Последовательность обработки

Сначала проверяются наличие начального и конечного измерений и корректность чисел. Далее операции группируются по уникальному идентификатору документа. Полностью совпадающая повторная запись исключается из суммы, а число таких повторов сохраняется. Если один идентификатор соответствует разным значениям, обработка завершается сообщением о конфликте.

Затем идентификаторы сопоставляются с отдельным реестром ожидаемых операций смены. При несовпадении формируется статус «недостаточно данных», а численный небаланс не выдается как итог проверки. Реестр предполагается доступным из независимого процесса регистрации документов; его нельзя получить из того же неполного журнала простым пересчетом строк.

Только после этих проверок суммируются массы и применяется порог. Прототип написан на Python; для точного выполнения заданной десятичной арифметики использован стандартный модуль decimal [4]. Контролируются конечность и неотрицательность масс, допустимое направление операции и неотрицательность расчетного остатка. Это программные проверки, не физическая аттестация данных.

Постановка модельного эксперимента

Сформированы пять сценариев по 30 независимых расчетных смен, всего 150 случаев. Два алгоритма обработали каждый случай: базовый расчет сумм без контроля операций и расчет с предварительными проверками. Получены 300 результатов обработки. Это искусственно составленные функциональные примеры, а не статистическая выборка с предприятия.

Для индекса i от 0 до 29 начальная масса задавалась как $1000 + 3i$ т. Поступление составляло $60 + 5r_5$ т, отпуск — $40 + 4r_4$ т, где r_5 и r_4 — остатки от деления i на 5 и 4. Истинный конечный остаток вычислялся по сохранению массы. Смены не образуют непрерывную историю одного резервуара: начальный остаток каждой задается независимо.

К истинному конечному остатку добавлялась повторяющаяся последовательность отклонений −0,12; 0,05; 0,15; −0,08; 0,02 т. Она иллюстрирует небольшое расхождение измерения и расчета, но не является оценкой неопределенности конкретного прибора. Случайная генерация не использовалась.

Таблица 1 — Сценарии изменения исходных данных

Сценарий	**Внесенное изменение**
Согласованные данные	Поступление и отпуск записаны однократно
Пропущенный отпуск	Документ отпуска удален из журнала; в реестре сохранен
Повторное поступление	Добавлена точная копия документа поступления
Смещение остатка	Конечное измерение дополнительно увеличено на 1,00 т
Нет конечного измерения	Конечная масса отсутствует

Базовый алгоритм при отсутствии измерения тоже не выполняет расчет: пропуск не подменяется нулем. В остальных случаях он использует все имеющиеся строки. Сравнение показывает вклад правил обработки операций при одинаковых балансовой формуле, измерениях и пороге.

Выполнение: Python 3.12.10. Все модельные входы, результаты отдельных смен и сводные таблицы сохранены. Дополнительно пройдены восемь программных проверок, включая ожидаемые статусы пяти сценариев, исключение 30 дублей, строгое сравнение на границе порога и отказ при противоречащих дубликатах.

Результаты

Таблица 2 — Число смен по статусам при пороге 0,5 т

Сценарий	М.	В пороге	Небаланс	Нет данных
Согласованные	Б	30	0	0
Согласованные	К	30	0	0
Пропуск отпуска	Б	0	30	0
Пропуск отпуска	К	0	0	30
Повтор прихода	Б	0	30	0
Повтор прихода	К	30	0	0
Смещение	Б	0	30	0
Смещение	К	0	30	0
Нет измерения	Б	0	0	30
Нет измерения	К	0	0	30

Б — базовый расчет; К — контроль записей и расчет. «Нет данных» обозначает недостаточную комплектность для итогового баланса. В каждой строке 30 смен.

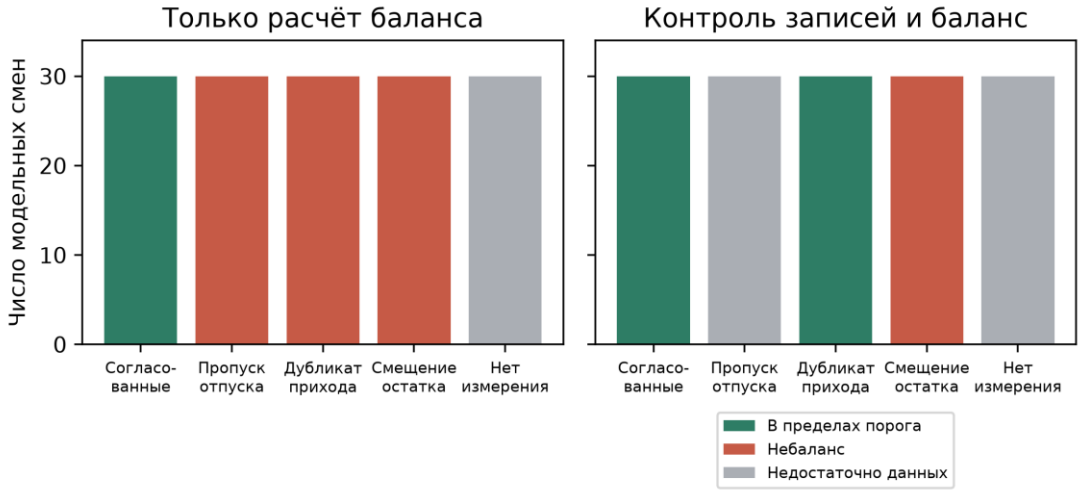

Рисунок 1 — Распределение статусов по сценариям

Повторы поступления вызвали 30 небалансов базового алгоритма; после удаления дублей все 30 смен вернулись в пределы порога. Пропуск отпуска дал 30 небалансов, которые проверка реестра отнесла к неполным данным. Пропущенная масса не восстанавливалась.

Смещение измерения +1 т выявлено в 30 сменах у обоих алгоритмов. Без конечного измерения оба отказались от расчета в 30 случаях. Обнаружение физических потерь этим не подтверждено.

Обсуждение и чувствительность к порогу

Для первой согласованной смены начальная масса равна 1000 т, поступление — 60 т, отпуск — 40 т. Расчетный остаток составляет 1020 т, измеренный — 1019,88 т, небаланс — +0,12 т. Если запись об отпуске отсутствует, базовый результат становится +40,12 т; повтор поступления дает +60,12 т. Эти расхождения возникают из-за учета операций, а не из-за внесенной в модель утечки.

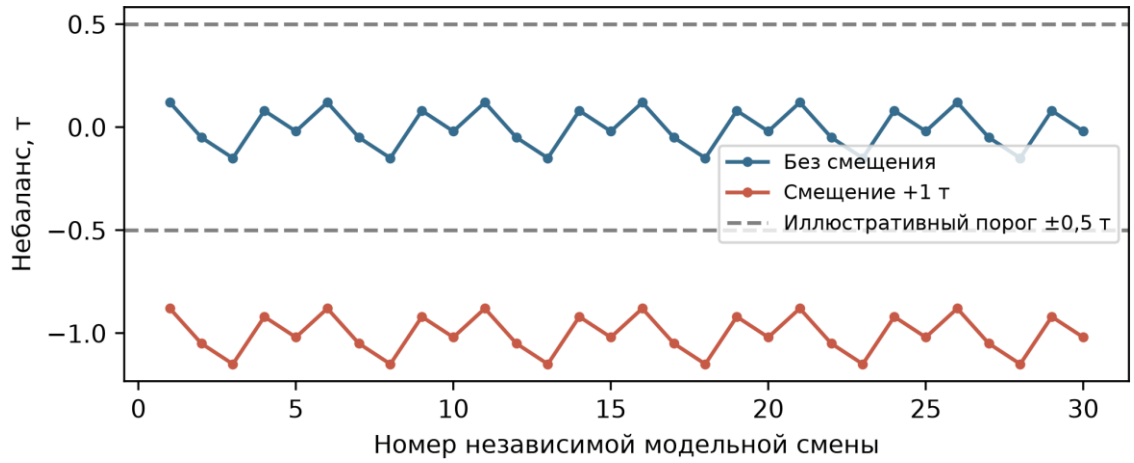

Рисунок 2 — Небаланс без смещения и со смещением измерения

Смещение измерения +1,00 т дает отрицательные расхождения от −1,15 до −0,88 т. По одному балансу нельзя различить смещение прибора и реальное изменение массы. Необходимы сверка документов, проверка времени отсечения смены и дополнительные измерения. Независимый реестр позволяет отличить известную неполноту, но не обнаруживает неучтенные события, отсутствующие одновременно во всех источниках.

Таблица 3 — Чувствительность числа срабатываний к порогу

Порог, т	Без смещения, из 30	Смещение +1 т, из 30
0,1	12	30
0,5	0	30
1,5	0	0

При 0,1 т алгоритм реагирует на 12 согласованных смен с заданными небольшими отклонениями. При 1,5 т он не реагирует ни на одно смещение +1 т. Это демонстрация зависимости от выбранного параметра, а не подбор оптимального промышленного порога. Ни частота ложных тревог на объекте, ни вероятность выявления утечек не оценивались.

Ограничения и практическое применение

Модель не учитывает реальные метрологические характеристики, коррелированные ошибки измерений, температурные пересчеты и технологические потери. Для внедрения нужны данные конкретного объекта, описание границ баланса и независимая проверка полноты документов. Достоверность реестра — отдельное условие, а не результат алгоритма.

Для нефтебаз, обслуживающих предприятия Сибири, модуль может рассматриваться как проектный элемент цифровой сверки товарных операций. Испытаний на объектах Сибири не проводилось. Система должна направлять спорные смены на проверку оператора, сохранять исходные записи, причины статусов и результаты исправлений. Экономический эффект и снижение потерь в работе не рассчитывались.

Заключение

Разработан воспроизводимый модуль контроля баланса нефтепродуктов. В 150 модельных случаях проверены пять сценариев. Предварительная обработка исключила влияние точных дублей в 30 сменах и отнесла 30 смен с пропущенным отпуском к неполным данным при наличии независимого реестра. Смещение остатка +1 т выявлено как небаланс во всех 30 соответствующих случаях при пороге 0,5 т. Эти результаты подтверждают программную логику в заданных условиях; промышленная эффективность и обнаружение физических утечек не установлены.

Список литературы

1. ПАО «НК «Роснефть». Сызранский НПЗ автоматизировал учёт отгрузки топлива. URL: https://limited.rosneft.ru/press/news/item/214125/.

2. National Institute of Standards and Technology. Measurement Uncertainty. URL: https://www.nist.gov/itl/sed/topic-areas/measurement-uncertainty.

3. US EPA. Standard Test Procedures For Evaluating Release Detection Methods: Statistical Inventory Reconciliation. EPA 510-B-19-004. 2019. URL: https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-05/documents/ust-stp-sir.pdf.

4. Python Software Foundation. decimal — Decimal fixed-point and floating-point arithmetic. URL: https://docs.python.org/3.12/library/decimal.html.

Дата обращения к электронным источникам: 29.10.2026.