

Разработка универсальной автоматической системы и алгоритма для калибровки нефтяных резервуаров

М. М. ИСАЕВ, М. А. АЛИЕВ, В. Г. АБДУЛЛАЕВ, Р. Б. НАЗАРОВ, М. Б. МАМЕДОВА

Институт систем управления национальной академии наук Азербайджана
Баку, Азербайджан, e-mail: mezahir@bk.ru

Разработана автоматизированная высокоточная калибровочная система и её информационное обеспечение для нефтяных резервуаров любой геометрической формы и размера. Высокая точность измерений реализована путём оптимального выбора гибридных тестов на базе структурно-алгоритмических и тестовых методов.

Ключевые слова: резервуар, жидкое топливо, гидростатическое давление, дифференциальное измерение, калибровочная таблица.

The task of development of automated high accuracy calibration system and its informational provision for the oil tanks of any geometrical configuration and size is considered. To ensure high precision measurements with application of appropriate hybrid tests based on structural algorithmic test methods the computer operated measurement system and software are developed.

Key words: reservoir, liquid fuel, hydrostatic pressure, differential measurement, calibration table.

Возможность измерений с высокой точностью количества нефти при приёме, хранении и отпуске со склада (резервуара) — актуальная задача. Неточность расчётов, проводимых по известным методам, приводит к потере значительного количества продукта из каждого резервуара. Нефтебаза содержит большое число крупногабаритных нефтяных резервуаров (НР), и погрешности измерений для каждого резервуара в сумме дают довольно заметные потери для всего склада, нефтебазы [1—4].

Массу жидкости в резервуаре находят используя таблицу индивидуальной калибровки (ТИК). Из ТИК определяется средняя площадь поперечного сечения резервуара для каждого процесса измерений. В настоящее время ТИК составляются с погрешностью $\pm 0,2\%$ [1, 2, 5, 6], что даёт около половины ($\pm 0,5\%$) общей погрешности при определении массы жидкостей. Такой результат связан с неточностью ручных методов определения ТИК, длительностью (в течении нескольких месяцев) периода калибровки (влияние окружающей среды приводит к значительным изменениям значений параметров объекта) и необходимостью лабораторных анализов физических параметров продукта (плотность, вязкость, температура). Всё это приводит к нарушениям в коммерческом учёте жидкостной массы, оставшейся в резервуаре, и в итоге значительное количество жидкого топлива (ЖТ) в НР остаётся неучтённым. Это означает серьёзный экономический ущерб для предприятия.

Коммерческий учёт ЖТ зависит от высокой точности измерений при калибровке каждого НР и составления ТИК. Для достижения высокой точности измерений в процессе калибровки резервуара необходимо дополнительно учитывать деформацию его стенок (постепенное изменение в поперечном сечении) за счёт гидростатического давления столба ЖТ.

В известном процессе калибровки объём жидкости, вводимый в резервуар, измеряется механическим счётчиком, высота столба жидкости — с помощью линейки (рулетки), температура в резервуаре — термометрами, установленными по диагонали в трёх точках [1—3, 5]. Среднюю плотность жидкости в резервуаре измеряют в лабораторных условиях на основе образцов, взятых в этих трёх точках. Составление ТИК ведут на основе следующих параметров — объёма столба ЖТ, средней площади поперечного сечения и действия гидростатического давления при деформации боковых стенок резервуара. Основные погрешности измерений появляются при определении параметров счётчика, линейки, термометра, плотности, гидростатического давления, деформации и т. д. Кроме них учитывают: высоту каждого столба жидкости в соответствии со средними областями поперечного сечения (на основании верхней и нижней зон); размеры внешней и внутренней поверхностей резервуаров; толщину стенки; физико-химические свойства подготовленного материала. А на их основе определяют поправочные коэффициенты, входящие в ТИК. Полученная в результате для каждого резервуара ТИК является достаточно сложной.

Коммерческий учёт ЖТ в НР осуществляют в основном за счёт высокоточного измерения гидростатического давления ЖТ. Калибровка резервуаров посредством такого процесса представляет известную проблему.

Целью данной работы является разработка автоматизированной системы калибровки с помощью единого дифференциального измерителя (датчика) давления и таблицы высокоточного измерения гидростатического давления столба жидкости в НР стандартной вместимости со сложной конфигурацией и геометрическими размерами.

Автоматическая система калибровки. Решение задачи высокоточного измерения гидростатического давления столба ЖТ в НР может быть получено с помощью дифференциального датчика давления [3, 7, 8]. Дифференциальные датчики давления (ДДД) производятся по современным технологиям и оснащены стандартным электрическим выходом. Процедуры измерения и управления в них полностью автоматизированы и упрощены. Совместимость схематического и программного обеспечений со всеми техническими средствами позволяет создать новую структуру калибровочной системы. Это обеспечивает довольно высокую точность измерений и эффективное управление [4, 7, 8].

Структурная схема системы автоматической калибровки НР представлена на рисунке. Выбираем эталонный резервуар (ЭР) стандартной вместимости, соответствующий калибровочному нефтяному резервуару (КНР). Наполняем ЭР жидким топливом с помощью насоса H из общего коллектора ОК через электронный вентиль ЭВ1. В калибровочный резервуар ЖТ поступает по наклонной трубе НТ через электронный вентиль ЭВ2. Для измерения гидростатического давления ЖТ, находящегося в эталонном резервуаре, вертикальная труба ВТ соединена с «+» камеры ДДД. Резервуары образуют замкнутую систему, где в поверхностном слое жидкости (свободной поверхности) накапливается газозвдушная смесь с определенным давлением, что существенно влияет на результаты измерений. Для учёта данного эффекта, свободные поверхности обеих вместимостей соединяем друг с другом воздушной трубой ВЗТ. Вентиль В3 используется для подключения ЭР к системе, а вентиль В4 — для истечения избытка ЖТ в общий коллектор после заполнения.

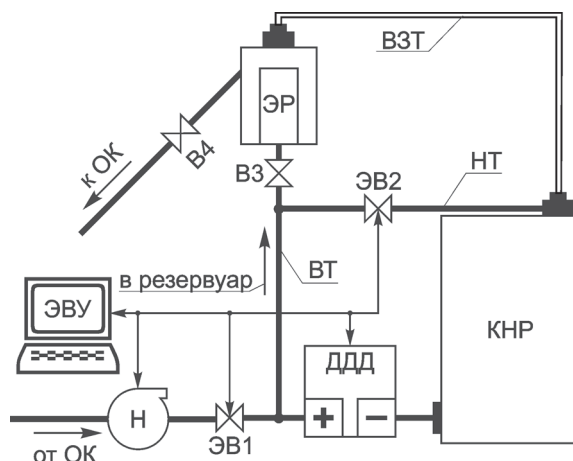
Алгоритм калибровки. Предварительно (до включения насоса) при закрытом электронном вентиле ЭВ1 и открытом электронным вентиле ЭВ2, измеряем выходной сигнал ДДД и определяем начальную разность давлений $\Delta p_0 = 0$. Это значение соответствует состоянию пустых вместимостей ЭР и КНР и в случае отличных от нуля значений учитывается в результатах следующих измерений тактов как корректирующий коэффициент.

1-й шаг. Электронный вентиль ЭВ1 открывается, а электронный вентиль ЭВ2 закрывается, включается насос и ЭР начинает заполняться. Насос отключается, когда заполнение завершается и ЭВ1 закрывается. Установленное суммарное давление $p_{1ЭР} + p_{ВТ} + p_{ЭР}^B$ передают на «+» камеры

ДДД, а давление $p_{КНР}^B$ воздуха, установленное в КНР на «-» этой камеры. Таким образом, измеряется разность давлений

$$\Delta p_1 = p_{1ЭР} + p_{ВТ} + p_{ЭР}^B - p_{КНР}^B, \quad (1)$$

где $p_{1ЭР}$, $p_{ВТ}$, $p_{ЭР}^B$, $p_{КНР}^B$ — давление в эталонном резервуаре, вертикальной трубе, на поверхности жидкости в ЭР и внутри КНР, соответственно. Воздушное пространство обеих вместимостей связано воздушной трубой. Давление будет



Структурная схема системы автоматической калибровки:

ВЗ, В4 — вентили; ВЗТ — воздушная труба; ВТ — вертикальная труба; ДДД — дифференциальный датчик давления; КНР — калибровочный нефтяной резервуар; Н — насос; НТ — наклонная труба; ОК — общий коллектор; ЭВ1 и ЭВ2 — электронные вентили; ЭВУ — электронно-вычислительное устройство; ЭР — эталонный резервуар

уравновешено $p_{ЭР}^B = p_{КНР}^B$, а формула (1) примет следующий вид:

$$\Delta p_1 = p_{1ЭР} + p_{ВТ} = m_1 g / S_{ЭР} + p_{ВТ}, \quad (2)$$

где m_1 — масса ЖТ в ЭР на первом такте; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения; $S_{ЭР}$ — средняя площадь поперечного сечения эталонного резервуара (постоянная величина). Массу ЖТ в ЭР находим из (2):

$$m_1 = (\Delta p_1 - p_{ВТ}) S_{ЭР} / g.$$

2-й шаг. Электронный вентиль ЭВ2 открывается, ЖТ массой m_1 выгружается в КНР, гидростатическое давление, созданное массой m_1 , устанавливается и подается на «-» камеры ДДД, а давление ЖТ в вертикальной трубе подается на «+» камеры ДДД, по завершении процесса измеряется разность давлений:

$$\Delta p_{11} = p_{ВТ} - p_{1ГД} = p_{ВТ} - M_1 g / S_1,$$

где $p_{1ГД}$ — гидростатическое давление, создаваемое массой $M_1 = m_1$ ЖТ в КНР; S_1 — средняя площадь поперечного сечения первого столба жидкости в КНР.

3-й шаг. Электронный вентиль ЭВ2 закрывается, а электронный вентиль ЭВ1 открывается, включается насос и ЭР наполняется ЖТ. По заполнении ЭР насос отключается и ЭВ1 закрывается; суммарное давление в ЭР и вертикальной трубе передают на «+» камеры ДДД, а давление $p_{1ГД}$ ЖТ массой m_1 в КНР — на «-» камеры ДДД, и измеряется разность давлений:

$$\Delta p_2 = p_{2ЭР} + p_{ВТ} - p_{1ГД} = m_2 g / S_{ЭР} + p_{ВТ} - m_1 g / S_1, \quad (3)$$

где m_2 — масса ЖТ в ЭР на втором такте; $p_{2ЭР}$ — давление в эталонном резервуаре на втором такте.

Массу m_2 находим из формулы (3):

$$m_2 = S_{ЭР} / g [(\Delta p_2 - p_{ВТ}) + m_1 / S_1].$$

4-й шаг. Электронный вентиль ЭВ2 открывается, ЖТ массой m_2 выгружается из ЭР в КНР, после заполнения КНР производим измерения с ДДД:

$$\Delta p_{12} = p_{BT} - p_{2ГД} = p_{BT} - M_2 g / S_2,$$

где $p_{2ГД}$ — гидростатическое давление, созданное массой $m_1 + m_2$ ЖТ в КНР; S_2 — средняя площадь поперечного сечения второго столба жидкости в КНР.

Измерения повторяются последовательно до заполнения КНР. Общее количество ЖТ, поступившего из ЭР в КНР, рассчитывается следующим образом:

$$M = m_1 + m_2 + \dots + m_N,$$

где m_N — масса ЖТ в ЭР на N -м такте.

На основе полученных результатов измерений рассчитываем среднюю площадь поперечного сечения для каждого столба, формируя таблицу индивидуальной калибровки. Собранные данные хранятся в базе данных (БД) в памяти ЭВМ, играя важную роль в текущей калибровке и финансово-хозяйственной деятельности компании, а также проведении коммерческого расчёта. По результатам процесса калибровки можно построить ТИК необходимой структуры. Полученные алгоритмы в соответствии с каждым измерением представлены в таблице.

Таблица индивидуальной калибровки резервуара

Измерение	Масса ЖТ в ЭР m_N	Масса ЖТ в КНР M_N
1	$(\Delta p_1 - p_{BT}) S_{ЭР} / g$	$(p_{BT} - \Delta p_{11}) S_1 / g$
2	$(\Delta p_2 - p_{BT}) S_{ЭР} / g$	$(p_{BT} - \Delta p_{12}) S_2 / g$
3	$(\Delta p_3 - p_{BT}) S_{ЭР} / g$	$(p_{BT} - \Delta p_{13}) S_3 / g$
...		
N	$(\Delta p_N - p_{BT}) S_{ЭР} / g$	$(p_{BT} - \Delta p_{1N}) S_N / g$

Методология автоматизированного проектирования ТИК.

Полученная в результате ТИК (см. таблицу) эффективна для индивидуальной калибровки НР желаемой формы. Ее фундаментальное отличие — высокая точность измерений и простота. Полная автоматизация процесса приводит к сокращению времени, рабочей силы и финансовых затрат, а значит — к экономии.

Значения $m_1, m_2, m_3, \dots, m_N$ равны массе жидкости, выгружаемой из ЭР в КНР, соответственно, на 1, 2, ..., N -м тактах, что значительно упрощает расчёты и существенно увеличивает эффективность калибровки. Это основное преимущество представленной системы, и достигается оно за счёт специальной конструкции ЭР. Избыток массы жидкости в ЭР сливается в побочный резервуар, заполняя его до уровня кончика вентиля В4 и далее по наклонной трубе в общий коллектор. Каждый раз количество ЖТ в ЭР остается неизменным, при этом боковые стенки ЭР не деформируются. Из полученных формул массы ЖТ для каждого столба сред-

нее сечение областей КНР рассчитывается следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= mg / (p_{BT} - \Delta p_{11}); \\ S_2 &= 2mg / (p_{BT} - \Delta p_{12}); \\ S_3 &= 3mg / (p_{BT} - \Delta p_{13}); \\ &\dots\dots\dots \\ S_N &= Nmg / (p_{BT} - \Delta p_{1N}), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $S_1, S_2, S_3, \dots, S_N$ — площадь поперечного сечения, соответствующая рассчитанной на основе результатов измерений ДДД, каждого ЭР при наложении ЖТ, после выгрузки в КНР; m — масса выгружаемого ЖТ из ЭР в КНР; p_{BT} — гидростатическое давление стабильной массы жидкости в вертикальной трубе; $\Delta p_{11}, \Delta p_{12}, \Delta p_{13}, \dots, \Delta p_{1N}$ — соответствующее гидростатическое давление столба жидкости в КНР.

Эталонный резервуар — это пара вертикальных цилиндров, встроенных друг в друга. Внутренний резервуар, играет роль ЭР, а внешний — служит для обеспечения функции накопления проливной жидкости после полного заполнения ЭР, при этом равновесие между столбами жидкости резервуаров предотвращает деформацию стенок. В течение всего процесса заполнения и измерения площадь поперечного сечения ЭР остается постоянной и массы жидкости в ЭР равны друг другу. Так как массы жидкостей, выгруженных в КНР, и текущие значения гидростатических давлений, создаваемых ими, известны, соответствующая средняя площадь поперечного сечения КНР определяется по формуле (4). Нелинейная функциональная зависимость между гидростатическим давлением, созданным эталонным ЖТ в КНР, и высотой и площадью поперечного сечения КНР, показывает деформацию на стенках КНР, создаваемую гидростатическим давлением столба жидкости.

Процесс считается завершённым (при N -м измерении) при равенстве нулю выходного сигнала ДДД. На основе этих значений, собранных в БД ЭВМ, система автоматизированного проектирования строит полную таблицу, состоящую из значений массы, объёма, высоты, плотности, площади поперечного сечения, соответствующей гидростатическому давлению столба жидкости, что отражает ТИК резервуаров в зависимости от их вместимости и формы.

Следует отметить, что применение этого метода исключает измерение температуры и плотности ЖТ в резервуаре. Массу ЖТ определяют на основе высокоточного измерения гидростатического давления ЖТ в нижней части резервуара в соответствии со значением средней площади поперечного сечения из ТИК. Для повышения точности измерений на всех этапах процесса разработан алгоритм тестирования, специальный программно-технический комплекс, а также информационно-программное обеспечение [3, 4, 7, 8].

Закключение. На основе одновременного измерения с высокой точностью гидростатического давления столбов жидкости в эталонном и калибровочном резервуарах с помощью одного и того же измерительного устройства — высокоточного измерительного дифференциального датчика давления, разработана автоматизированная система калибровки для нефтяных резервуаров любой геометрической формы и вместимости.

Высокая точность измерений обеспечивается путём оптимального выбора гибридных тестов и их реализации на основе структурно-алгоритмических методов.

Литература

1. **ГОСТ 8.346—2000.** ГСИ. Резервуары стальные горизонтальные цилиндрические. Методика поверки.
2. **ГОСТ 8.380—2000.** ГСИ. Резервуары стальные вертикальные цилиндрические вместимостью 100—50000 м³. Методы и средства поверки.
3. **Гаджиев Ч. М., Исаев М. М.** Методы обработки измерений в ИИС определения массы нефтепродуктов в резервуарах. Баку: Элм, 2000.
4. **Гаджиев Ч. М., Исаев М. М., Ахмедов Т. Г., Садыхов Р. А.** Планирование эксперимента в задачах измерения массы нефтепродуктов в резервуарах // Измерительная техника. 1996. № 6. С. 36—38.
5. **Пат. 2327118 РФ.** Способ градуировки резервуаров / В. И. Кабанов, О. В. Молчанов, В. К. Наumenко, М. С. Бобак, С. В. Сорока, С. В. Старый // Изобретение. Полезные модели. 2008. № 17.

6. **Пат. 2329472 РФ.** Способ автоматизированного контроля и учета массы нефтепродуктов на топливных базах при их хранении в вертикальных и горизонтальных резервуарах / Э. Н. Шенкман, С. Н. Наumenко, Л. К. Мартынов // Изобретение. Полезные модели. 2008. № 20.

7. **Мамедов Р. Г., Исаев М. М., Агаев Ф. Г., Мехтизаде Э. К.** Структурно-алгоритмические методы повышения точности измерений // Проблемы нефтегазовой промышленности. 2010. Вып. 8. С. 229—242.

8. **Исаев М. М., Мамедов Р. Г., Мехтизаде Э. К., Гусейнов И. Э.** Повышение точности измерений с помощью комбинированных тестовых алгоритмов // Известия НАН Азербайджана. Серия физико-математических и технических наук. 2009. Т. XXIX. № 6. С. 158—165.

Дата принятия 27.07.2015 г.

ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

621.317.76

Оптимальный алгоритм синхронизации шкалы времени квантовых часов

Г. П. ПАШЕВ

Нижегородский научно-исследовательский приборостроительный институт «Кварц»
им. А. П. Горшкова, Н. Новгород, Россия, e-mail: kvarz_asu@kvarz.com

Предложен алгоритм синхронизации шкалы времени квантовых часов. Алгоритм позволяет исключить систематическую погрешность синхронизации и минимизировать случайную погрешность. Найдены формулы для расчёта оптимального числа измерений и минимальной погрешности.

Ключевые слова: квантовые часы, синхронизация.

An algorithm for quantum clock time scale synchronization is proposed. The algorithm allows to eliminate the systematic synchronization error and minimize the random error. The formulae to determine the optimal number of measurements and minimum error are obtained.

Key words: quantum clock, synchronization.

Квантовые часы являются одним из основных компонентов вторичных эталонов времени и частоты, систем радионавигации и пассивной радиолокации. В ходе эксплуатации квантовых часов в составе таких систем необходимо синхронизировать или привязать их шкалу времени к шкале времени более точных, например, эталонных часов.

Квантовые часы (рис. 1) содержат опорный квантовый стандарт частоты (КСЧ) и формирователь шкалы времени. Частота сигнала КСЧ подстраивается по сигналу эталонных часов для уменьшения хода квантовых часов [1, 2]. В формирователе высокочастотный сигнал (10 МГц) КСЧ преобразуется в шкалу времени — последовательность импульсов с периодом T (обычно $T = 1$ с), положение импульсов на оси времени регулируется двумя ступенями. Грубая регулировка

с дискретностью 100 нс выполняется принудительной установкой в нулевое состояние цифрового делителя частоты в диапазоне 10 МГц—1 Гц. Точная регулировка (до единиц пикосекунд) производится с помощью управляемой линии задержки (микростеппера) [3] или кратковременной отстройки частоты сигнала 10 МГц КСЧ в результате использования специального дополнительного генератора [4—7].

Для синхронизации квантовых и эталонных часов применяют цифровой измеритель временных интервалов (ИВИ). В измерителе формируются счётные импульсы из высокочастотного выходного сигнала эталонных или квантовых часов. На вход «СТАРТ» ИВИ подаёт сигнал 1 Гц шкалы времени квантовых часов, а на вход «СТОП» — такой же сигнал эталонных часов. Сигналы шкал передаются по следующим