

Заключение. Проведенный анализ показал высокую эффективность применения фильтра Калмана для измерений отклонений частоты КСЧ и синхронизации по радиосигналам КНС. Показана возможность простых расчетов оптимальных коэффициента усиления фильтра и погрешностей измерений указанных частот. Для расчетов достаточно знать среднее квадратическое двухвыборочное случайное относительное отклонение частоты КСЧ (вариацию Аллана) $\sigma_y^2(T, T)$ и среднее квадратическое значение шума частоты радиосигнала КНС.

Л и т е р а т у р а

1. Smaliy Y. S., Ibarro-Manzano O., Arceo-Miquel L. Efficient Predictive Steering of Local Clocks in GPS — based Timekeeping // Proc. Europ. Frequency and Time Forum, 2009. P. 727—732.

2. Пашев Г. П. Хранение единицы частоты и шкалы времени высокостабильным генератором при его синхронизации по радиосигналу космических навигационных систем // Измерительная техника. 2012. № 12. С. 26—31; Pashev G. P. Frequency and Time — keeping by High-stability Generator Synchronized by Radio Signal from Space Navigation Systems // Measurement Techniques. 2012. V. 55. N 12. P. 1379—1387.

3. ГОСТ 8.967—99. ГСИ. Измерения времени и частоты.

4. Рютман Ж. Характеристики частоты и фазы сигналов высокостабильных генераторов // ТИИЭР. Т. 66. № 9. 1978. С. 70—102.

5. Первачев С. В. Радиоавтоматика. М.: Радио и связь, 1982.

Дата принятия 13.10.2013 г.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

53.089.6:625.254.6/3.001.4:531.73:006.354

Уточнение поправки к вместимости вертикального резервуара, обусловленной воздействием гидростатического давления

В. М. МИГРАНОВ

Всероссийский научно-исследовательский институт расходометрии, Казань, Россия, e-mail: vniir.nio-7@yandex.ru

Представлены формулы для определения поправок к вместимости вертикальных стальных цилиндрических резервуаров, обусловленных изменением гидростатического давления столба жидкости в пределах каждого пояса резервуара.

Ключевые слова: вместимость, гидростатическое давление, градуировочная таблица.

The relationships for determination of corrections to the storage capacity of vertical steel cylinder tanks due to a change of hydrostatic pressure of liquid column within the each tank ring limits are presented.

Key words: storage capacity, hydrostatic pressure, calibration table.

Вертикальные стальные цилиндрические резервуары, предназначенные для хранения нефти и нефтепродуктов (далее — жидкости), представляют собой тонкостенную конструкцию. Изменение деформации стенки резервуара и увеличение его вместимости под действием гидростатического давления жидкости по высоте резервуара носят нелинейный характер.

Цилиндрическая часть резервуара состоит из отдельных поясов, высота которых равна ширине листовой стали 1500—3000 мм. Толщина стенки поясов t в зависимости от вместимости резервуаров составляет 4—32 мм. При этом

толщина первого (нижнего) пояса максимальная, затем, по мере увеличения номера пояса, его толщина уменьшается. Число поясов 4—12 зависит от вместимости резервуаров, которая составляет 100; 200; 300; 400; 700; 1000; 2000; 3000; 5000; 10000; 15000; 20000; 30000; 50000; 100000 м³.

Для обеспечения единства измерений объема и массы жидкости, находящейся в резервуаре, важно уточнять изменение вместимости резервуара в пределах каждого пояса (см. рисунок).

Поправку к объему при наполнении i -го пояса вычисляют по формуле (Г.54), приведенной в [1]:

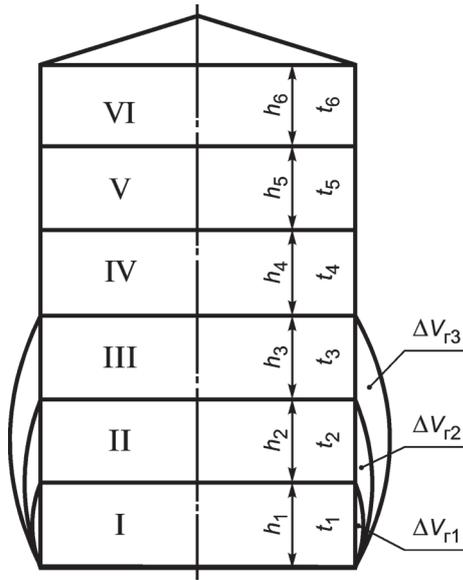


Схема деформации стенки поясов резервуара:

I, II, ..., VI — номера поясов; h_1, h_2, \dots, h_6 — высота поясов; t_1, t_2, \dots, t_6 — толщина стенок поясов; $\Delta V_{rA1}, \Delta V_{rA2}, \Delta V_{rA3}$ — поправки к вместимости резервуара из-за гидростатического давления жидкости после наполнения соответственно первого, второго и третьего поясов

$$\Delta V_{ri} = A_2 \left\{ \frac{0,8h_1}{t_1} \left(\sum_{j=1}^i h_j - \frac{h_1}{2} \right) + \sum_{l=2}^{i-1} \left[\frac{h_l}{t_l} \left(\sum_{j=1}^{i-1} h_j - \frac{h_l}{2} \right) \right] \right\}, \quad (1)$$

где A_2 — постоянный коэффициент,

$$A_2 = \pi g \rho_{ж} D^3 / (4 \cdot 10^{12} E); \quad (2)$$

$g = 9,8066 \text{ м/с}^2$; $\rho_{ж}$ — плотность хранимой жидкости, кг/м^3 ; D — внутренний диаметр резервуара, мм; E — модуль упругости материала стенки резервуара (для стали $E = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ Па}$).

В соответствии с (1) запишем

$$\Delta V_{r1} = A_2 \cdot 0,8h_1^2 / (2t_1);$$

$$\Delta V_{r2} = A_2 \left\{ \frac{0,8h_1}{t_1} \left(\frac{h_1}{2} + h_2 \right) + \frac{h_2^2}{t_2^2} \right\};$$

.....

$$\Delta V_{ri} = \frac{0,8h_1}{t_1} \left(\frac{h_1}{2} + h_2 + h_3 + \dots + h_i \right) + \frac{h_2}{t_2} \left(\frac{h_2}{2} + h_3 + \dots + h_i \right) + \frac{h_i^2}{t_i}.$$

Для составления градуировочной таблицы на вместимость резервуара необходимо найти поправки к ней в пределах каждого пояса, которые вычисляют по следующим формулам:

$$\Delta W'_1 = \Delta V_{r1} = A_2 \cdot 0,8h_1^2 / (2t_1) \text{ — для первого пояса;} \quad (3)$$

$$\Delta W'_2 = (\Delta V_{r2} - \Delta V_{r1}) = A_2 \left(\frac{0,8h_1}{t_1} + \frac{h_2}{2t_2} \right) h_2 \text{ — для второго пояса;} \quad (4)$$

.....

$$\Delta W'_i = (\Delta V_{ri} - \Delta V_{r(i-1)}) = A_2 \left(\frac{0,8h_1}{t_1} + \frac{h_2}{t_2} + \dots + \frac{h_i}{2t_i} \right) h_i \text{ — для } i\text{-го пояса.} \quad (5)$$

Аналогичные формулы приведены в [2].

Поправки, вычисляемые по (3)—(5), имеют постоянное значение в пределах каждого пояса. Однако, как было отмечено выше, деформация стенки резервуара под действием гидростатического давления жидкости нелинейно изменяется по высоте каждого пояса и резервуара в целом. Чтобы установить характер распределения поправок к вместимости резервуара по высоте каждого пояса, разработана уточненная методика их определения.

Для этой цели высота каждого пояса делится на десять равных участков, т. е. для первого пояса $\Delta h_1 = h_1/10$; для второго пояса $\Delta h_2 = h_2/10$; для i -го пояса $\Delta h_i = h_i/10$, причем каждый участок пояса считается самостоятельным и поправка внутри него принимается постоянной, как и в пределах всего пояса.

Поправку к вместимости первого пояса резервуара после заполнения 1, 2, ..., j -го участков вычисляют последовательно по формуле

$$\Delta W_{1j}^* = A_2 \cdot 0,8 \frac{\Delta h_1^2}{t_1} \left[\sum_{j=1}^{10} [0,5 + 1(j-1)] \right], \quad (6)$$

где $\Delta h_1, t_1$ — высота участка и толщина стенки первого пояса, мм; $j = \overline{1, 10}$.

Выражение $[0,5 + 1(j-1)]$, входящее в (6), является арифметической прогрессией, в которой: 0,5 — первый член прогрессии, 1 — ее разность, j — номер члена. Отсюда следует, что поправка к вместимости резервуара в пределах пояса изменяется по арифметической прогрессии, что установлено впервые в мировой практике.

Поправку к вместимости второго пояса резервуара после заполнения его десяти участков вычисляют последовательно как

$$\Delta W_{2j}^* = A_2 \left\{ \left(0,8 \frac{h_1}{t_1} \right)_j + \frac{\Delta h_2}{t_2} \sum_{j=1}^{10} (j-0,5) \right\} \Delta h_2, \quad (7)$$

где h_1, t_1 — высота и толщина стенки первого пояса, мм; $\Delta h_2, t_2$ — высота участка и толщина стенки второго пояса, мм; $j = \overline{1, 10}$.

Поправку к вместимости вышестоящего i -го пояса резервуара после заполнения его десяти участков вычисляют последовательно по формуле

$$\Delta W_{ij}^* = A_2 \left\{ \left(0,8 \frac{h_1}{t_1} + \frac{h_2}{t_2} + \dots + \frac{h_{i-1}}{t_{i-1}} \right)_j + \frac{\Delta h_i}{t_i} \sum_{j=1}^{10} [(j-0,5)] \right\} \Delta h_i, \quad (8)$$

где h_1, h_2, \dots, h_{i-1} — высоты поясов резервуара, мм; $j = \overline{1, 10}$.

Абсолютную погрешность между результатами вычисления величин $\Delta W_{ij}^*, \Delta W'_{ij}$ определяют по формуле

$$\Delta F_{ij} = \Delta W_{ij}^* - \Delta W'_{ij}. \quad (9)$$

Исходные данные для расчета: число поясов $i = 9$; толщина стенки $t = 26; 24; 22; 18; 16; 14; 13; 13; 13$ мм; высота $h_1 = 2000$ мм; диаметр первого пояса резервуара $D = 60643$ мм; плотность жидкости $\rho_{ж} = 800$ кг/м³; $g = 9,81$ м/с². Из (2) находим

$$A_2 = \frac{\pi \cdot 9,81 \cdot 800 \cdot 60643^3}{4 \cdot 10^{12} \cdot 2,1 \cdot 10^{11}} = 6,546 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{мм}.$$

Результаты вычислений поправок к вместимости первого пояса резервуара, выполненных по (6), приведены в табл. 1.

Таблица 1

Поправки к вместимости первого пояса резервуара

j	ΔW_{1j}^* , м ³	$\Delta W'_{1j}$, м ³	ΔF_1 , м ³ , по (9)
10	0,076	0,04	0,036
9	0,068	0,04	0,028
8	0,060	0,04	0,020
7	0,052	0,04	0,012
6	0,044	0,04	0,004
5	0,036	0,04	-0,004
4	0,028	0,04	-0,012
3	0,020	0,04	-0,020
2	0,012	0,04	-0,028
1	0,004	0,04	-0,036

Как было отмечено выше, значения поправок, приведенные во втором столбце табл. 1, изменяются по арифметической прогрессии. Ее сумма

$$S_1 = (\Delta W_{11}^* + \Delta W_{110}^*) \cdot 10/2 = (0,004 + 0,076) \cdot 10/2 = 0,4 \text{ м}^3.$$

Значение поправки к вместимости первого пояса в соответствии с (3):

$$\Delta W'_1 = 0,6546 \cdot 10^{-5} \cdot 0,8 \cdot 2000^2 / (2 \cdot 26) = 0,403 \text{ м}^3.$$

Сумма поправок по третьему столбцу $0,04 \cdot 10 = 0,4$ м³, что подтверждает правильность формулы (6).

Результаты вычисления по (8) поправок к вместимости по участкам второго пояса резервуара представлены в табл. 2.

Таблица 2

Поправки к вместимости второго пояса резервуара

j	ΔW_{2j}^* , м ³	$\Delta W'_{2j}$, м ³	ΔF_2 , м ³ , по (7)
10	0,184	0,135	0,049
9	0,173	0,135	0,038
8	0,162	0,135	0,027
7	0,157	0,135	0,017
6	0,140	0,135	0,005
5	0,130	0,135	-0,005
4	0,119	0,135	-0,0160
3	0,108	0,135	-0,027
2	0,097	0,135	-0,038
1	0,086	0,135	-0,049

Сумма поправок по второму столбцу табл. 2

$$S_2 = (\Delta W_{21}^* + \Delta W_{210}^*) \cdot 10/2 = (0,086 + 0,184) \cdot 10/2 = 1,35 \text{ м}^3.$$

Значение поправки к вместимости второго пояса согласно (4)

$$\Delta W'_2 = 6,546 \cdot 10^{-6} \left(\frac{0,8 \cdot 2000}{26} + \frac{2000}{2 \cdot 24} \right) \cdot 2000 = 1,35 \text{ м}^3,$$

что подтверждает правильность формулы (7).

Результаты вычисления поправок к вместимости девятого (последнего) пояса резервуара, выполненные по (8), приведены в табл. 3.

Таблица 3

Поправки к вместимости девятого пояса резервуара

j	ΔW_{9j}^* , м ³	$\Delta W'_{9j}$, м ³	ΔF_9 , м ³ , по (8)
10	1,399	1,308	0,091
9	1,379	1,308	0,071
8	1,358	1,308	0,050
7	1,338	1,308	0,030
6	1,318	1,308	0,010
5	1,298	1,308	-0,010
4	1,278	1,308	-0,030
3	1,258	1,308	-0,050
2	1,238	1,308	-0,071
1	1,218	1,308	-0,090

Сумма поправок по второму столбцу табл. 3

$$S_9 = (\Delta W_{91}^* + \Delta W_{910}^*) \cdot 10/2 = (1,218 + 1,399) \cdot 10/2 = 13,08 \text{ м}^3.$$

Таким образом, получены расчетные формулы, устанавливающие изменение вместимости в пределах высоты поясов резервуара вследствие гидростатического давления столба жидкости. Установлено, что вместимость по высоте пояса изменяется по арифметической прогрессии. Использование полученных результатов позволит повысить достоверность результатов измерений объема, массы нефти и нефтепродуктов в вертикальных стальных цилиндрических резервуарах.

Литература

- ГОСТ 8.570—2000 (с Изменениями № 1, 2). ГСИ. Резервуары стальные вертикальные цилиндрические. Методика поверки.
- ISO 7501-1:2003. Нефть и жидкие нефтепродукты. Калибровка вертикальных цилиндрических резервуаров. Ч. 1. Метод обмера резервуара.

Дата принятия 08.07.2013 г.