

ГРАДУИРОВКА КОЛОКОЛА УСТАНОВОК ДЛЯ ПОВЕРКИ СЧЕТЧИКОВ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ

Ю.В. Кузьменко, заместитель генерального директора по метрологии и научной деятельности
ГП “Укрметртестстандарт”, г. Киев

А.Н. Самойленко, доктор технических наук, директор научно-производственного института
ГП “Укрметртестстандарт”, г. Киев



Ю.В. Кузьменко



А.Н. Самойленко

Рассмотрен вопрос градуировки колокола установки для поверки счетчиков текущей среды лазерным трекером FARO. Предложена методика оценки общей и интервальных вместимостей колокола по координатам точек. Предложен алгоритм вычисления поправок к интервальным вместимостям за рельеф поверхности колокола. Разработан общий подход к оценке неопределенности измерений интервальных вместимостей колокола.

The question of calibration of the bell for fluid flow meters verification facilities by Laser Tracker FARO is considered. The method of general and interval bell's capacities estimation by point coordinates is offered. The bells relief correction data to interval capacities calculation algorithm is offered. The general approach to the evaluation of uncertainty of interval bell's capacities measurement is developed.

Как указано в Комплексной государственной программе энергосбережения Украины, приоритетными направлениями энергосбережения, наряду с внедрением современных технологий и использованием вторичных ресурсов, является усовершенствование учета и контроля потребления энергоресурсов [1]. При этом должно уделяться внимание осуществлению мероприятий по экономному использованию питьевой воды, тепловой энергии и газа в жилищно-коммунальном хозяйстве за счет внедрения эффективного оборудования и приборов учета, регулирования и контроля.

Для измерения объема потребленной воды и газа применяются соответствующие счетчики [2]. Для обеспечения достоверности измерений в столь важной сфере, как учет энергоресурсов, необходимо проводить поверку применяемых приборов

с помощью эталонов, основной составной частью которых является эталонное средство измерения объема. Для поверки счетчиков воды применяются волюметрические установки с мерниками [3], для счетчиков газа – установки колокольного типа [4]. Для ведения учетных и торговых операций с нефтью и нефтепродуктами применяют вертикальные и горизонтальные стальные цилиндрические резервуары [5, 6]. Основным средством измерений в указанных установках являются средства измерения объема (СИО) цилиндрической формы.

При проведении калибровки или государственной метрологической аттестации указанных СИО необходимо определить зависимость реального объема их цилиндра от его высоты, то есть выполнить градуировку с требуемой неопределенностью (точностью).

Градуировка указанных СИО может осуществляться геометрическим методом.

При этом классические методы определения геометрических размеров СИО, основанные на применении различных механических средств измерений длины, исчерпали себя по точности. Хотя применяемые при измерении геометрических размеров механические или электромеханические средства измерений имеют достаточную точность, сложность методики выполнения измерений при градуировке СИО вносит в результат измерений дополнительные неопределенности.

Трудность состоит в том, что при измерении диаметра цилиндра нутромером или другим средством измерений необходимо найти максимальное значение диаметра в плоскости, перпендикулярной оси цилиндра, и минимальное значение в плоскости, проходящей через ось цилиндра. Решение такой противоречивой задачи при каждом измерении диаметра может увеличивать неопределенность результатов измерений в десятки раз. Автоматизированные координатно-измерительные машины [7] были бы эффективны для этих измерений, но приборы с диапазоном измерений, необходимым для определения размеров указанных СИО, очень редки, дороги, габаритны и стационарны.

Путем увеличения точности установок для поверки счетчиков жидкости и газа, а также резервуаров для нефтепродуктов может быть не только увеличена точность определения среднего диаметра

СИО, а и учет реального рельефа его внутренней поверхности относительно цилиндра среднего радиуса в радиальном направлении. Определение этих радиальных отклонений реальной поверхности СИО от цилиндра делает необходимым проведение большого количества измерений. Классические нутрометрические измерения при этом не только недостаточно надежны по точности, они также очень трудоемки и не всегда возможны или крайне затруднены при больших размерах СИО [8]. Кроме того, каждое измерение диаметра не зависит друг от друга и не привязано к оси цилиндра. Поэтому при таких измерениях не создается полного представления об отклонениях реальной поверхности СИО от цилиндра. Это делает невозможным отличить реальные колебания рельефа относительно цилиндра от промахов.

Постановка задачи

Задача состоит в разработке методики измерения геометрических размеров СИО с помощью лазерного трекера [9–11] и методики обработки результатов измерений с целью уменьшения неопределенности измерений объема СИО, что, в свою очередь, позволит повысить точность установок для поверки счетчиков жидкости и газа.

Решение задачи

Экспериментальные исследования проводились на вторичном эталоне расхода газа. Выполнялись измерения геометрических размеров колокола, входящего в состав вторичного эталона.

При измерениях колокол диаметром 0,7 м и длиной 1,2 м располагался горизонтально и был жестко закреплен на ложементах, установленных на бетонном полу. Лазерный трекер был установлен на металлической плите так, чтобы его центр располагался на оси цилиндра на расстоянии 3,5 м от края колокола. Ось абсцисс системы координат трекера была ориентирована параллельно оси цилиндра.

Установка сферического отражателя в точках координирования производилась с помощью специальной штанги с магнитным посадочным гнездом. Применение штанги позволило значительно уменьшить температурное влияние оператора на колокол.

При исследованиях применялся лазерный трекер Faro ION со следующими метрологическими характеристиками [10, 11]:

суммарная стандартная неопределенность измерения горизонтальных и вертикальных углов $(10 + 2,5 \cdot L)$ мкм, где L – измеренное значение расстояния, выраженное в метрах;

суммарная стандартная неопределенность измерения расстояний $(8 + 0,4 \cdot L)$ мкм.

Суммарную стандартную неопределенность измерения горизонтальных и вертикальных углов выражают через длину дуги, соответствующую углу, равному погрешности измерения угла. Так ее легче сравнивать с неопределенностью измерения длины.

Для учета реальной температуры поверхности колокола на нем были установлены восемь датчиков температуры, подключенных к вторичному прибору. Температура поверхности колокола измерялась с интервалом 10 мин, неопределенность измерений составляла $0,1^\circ\text{C}$. В качестве температуры колокола принималось среднее значение всех измеренных восемью датчиками температур.

Обобщенная схема измерений представлена на рис. 1.

Лазерный трекер выполняет автоматическое слежение за уголковым отражателем, встроенным в специальную сферу диаметром полтора дюйма, на центре которой фактически выполняются угловые и линейные измерения. С помощью трекера выполняют измерения расстояния S_i , горизонтальных N_i и вертикальных Z_i углов на центр сферы (рис. 1). Вычисленные по измеренным значениям расстояния и углов пространственные координаты опорной точки в введенной прямо-

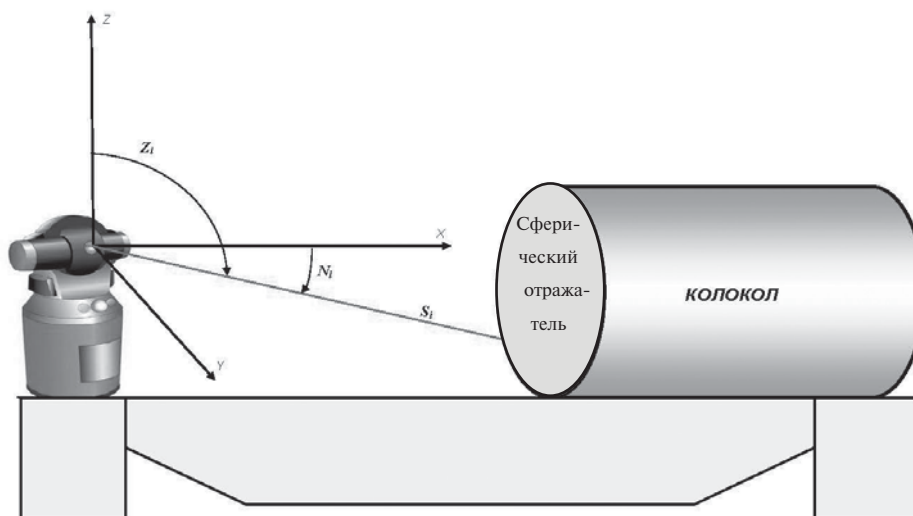


Рис. 1. Обобщенная схема измерений пространственных координат опорных точек на внутренней поверхности колокола

угольной системе координат фиксируются в памяти трекера. При этом при вычислениях координат опорных точек на поверхности учитывается известный диаметр сферического отражателя.

Во время эксперимента определялись координаты 30–38 точек, равномерно расположенных по окружности цилиндра колокола в каждом из 16 продольных сечений и еще в одном дополнительном сечении по сварному шву. Всего были определены координаты около 600 опорных точек.

Перед измерениями координаты точек пересчитывались программой преобразования из системы в систему координат таким образом, как будто цилиндр находился приблизительно в вертикальном положении.

При разработке методики обработки результатов измерений можно выделить такие основные задачи:

- оценка геометрических параметров поверхности колокола посредством аппроксимации измеренных пространственных координат с помощью метода наименьших квадратов (МНК);
- оценка неопределенности определения геометрических параметров поверхности колокола с помощью МНК;

- вычисление градуировочных характеристик (интервальных вместимостей) колокола с использованием найденных геометрических параметров и реальной формы колокола относительно аппроксимирующей поверхности;

- оценка с помощью МНК неопределенности градуировочной характеристики объема колокола на основе оценки неопределенности определения геометрических параметров поверхности объекта.

В качестве модели измерений, связывающей координаты каждой из опорных точек на поверхности с геометрическими параметрами этой поверхности, приняты следующие функции:

$$\begin{aligned} \varphi_1(x_1, y_1, z_1, \tau_1, \dots, \tau_k) &= 0; \\ &\dots \\ \varphi_i(x_i, y_i, z_i, \tau_1, \dots, \tau_k) &= 0; \\ &\dots \\ \varphi_n(x_n, y_n, z_n, \tau_1, \dots, \tau_k) &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где $i = 1, \dots, n$ – номер опорной точки на поверхности объекта; n – количество опорных точек на поверхности, координаты которых определяются; x_i, y_i, z_i – горизонтальные координаты и абсолютная высота i -й опорной точки на поверхности объекта, которые измеряются трекером; τ_1, \dots, τ_k – определяемые геометрические параметры поверхности объекта; k – количество определяемых геометрических параметров.

Абсолютная высота i -й опорной точки – это расстояние по вертикали от наинизшей горизонтальной плоскости, принятой за начало рабочей части колокола, до i -й опорной точки.

Из-за неровностей поверхности и неопределенности измерений координат равенства (1) не выполняются. Поэтому для оценки определяемых геометрических параметров необходимо составить уравнения поправок, которые получаются путем частного дифференцирования модели измерений (1) по измеренным координатам и определяемым параметрам:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_i &= \frac{\partial\varphi_i}{\partial x_i} v_{x_i} + \frac{\partial\varphi_i}{\partial y_i} v_{y_i} + \frac{\partial\varphi_i}{\partial z_i} v_{z_i} = \\ &= \frac{\partial\varphi_i}{\partial\tau_1} \delta\tau_1 + \dots + \frac{\partial\varphi_i}{\partial\tau_j} \delta\tau_j + \dots + \frac{\partial\varphi_i}{\partial\tau_k} \delta\tau_k + l_i, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\Delta\varphi_i = \vartheta_i$ – поправка в радиальном направлении для i -й опорной точки; $v_{x_i}, v_{y_i}, v_{z_i}$ – поправки к измеренным координатам i -й опорной точки на поверхности; $\delta\tau_1, \delta\tau_j, \delta\tau_k$ – поправки к приближенным значениям определяемых параметров $\tau_1^0 \dots \tau_k^0$; $l_i = \varphi_i(x_i, y_i, z_i, \tau_1^0 \dots \tau_k^0)$ – свободный член уравнения поправок.

В матричном виде система параметрических уравнений поправок (2) представима в виде

$$A \cdot V = B \cdot \delta\tau + l \quad (3)$$

или

$$\vartheta = B \cdot \delta\tau + l, \quad (4)$$

где A – матрица частных производных от модели измерений (1) по измеренным координатам точек; V – матрица поправок к измеренным координатам точек; ϑ – диагональная матрица радиальных отклонений реальной поверхности колокола от аппроксимирующего цилиндра; B – матрица частных производных от модели измерений (1) по определяемым геометрическим параметрам; $\delta\tau$ – вектор поправок к приближенным значениям определяемых параметров; l – вектор свободных членов уравнений поправок.

Радиальные отклонения – это кратчайшие расстояния между реальной поверхностью колокола и аппроксимирующим цилиндром в радиальном направлении. Именно они имеют решающее значение при оценке неопределенности геометрических параметров и объема колокола.

Учитывая то, что параметрических уравнений поправок (2) значительно больше, чем определяемых геометрических параметров, составляется система нормальных уравнений, которую в матричном виде можно представить как

$$B^T \cdot B \cdot \delta\tau + B^T \cdot l = 0 \quad (5)$$

или

$$N \cdot \delta\tau + L = 0. \quad (6)$$

При составлении системы принималось во внимание, что $B^T \cdot \vartheta = 0$.

Поправки к приближенным значениям геометрических параметров в матричном виде определяются по формуле

$$\delta\tau = -N^{-1} \cdot L = -Q \cdot L, \quad (7)$$

где $N^{-1} = Q$ – матрица, обратная к матрице коэффициентов нормальных уравнений из (5), (6).

Стандартное радиальное отклонение σ_{ϑ} реальной поверхности колокола от аппроксимирующей и корреляционная (ковариационная) матрица определяемых геометрических параметров поверхности колокола вычисляются по формулам

$$\sigma_{\vartheta} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \vartheta_i^2}{n-k}};$$

$$K_{\delta\tau} = \sigma_{\vartheta}^2 \cdot Q.$$

Полученные радиальные отклонения отвечают основным принципам МНК:

$$\sum_{i=1}^n \vartheta_i = 0; \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^n \vartheta_i^2 = \min.$$

К геометрическим параметрам колокола относятся:

- параметры положения колокола в пространстве – горизонтальные координаты точки пересечения наинизшей горизонтальной плоскости, принятой за начало рабочей части колокола, и его оси (для вычисления вместимости колокола не используются, но обязательно входят в (1) и необходимы при вычислениях по (2)–(7));

- параметры его ориентирования в пространстве – углы между осью колокола и координатными осями или плоскостями, например, угол и направление (азимут) наклона оси цилиндра колокола;

- параметры размеров и формы колокола – средний радиус аппроксимирующего цилиндра колокола.

Геометрические параметры ориентирования, размеров и формы входят в формулы для вычислений градуировочной характеристики объема колокола:

$$V_{z_f} = \psi_V(\tau_1 \dots \tau_k, z_f), \quad (9)$$

где z_f – абсолютная высота уровня жидкости в колоколе с текущим номером f , для которой вычисляется интервальная вместимость.

Интервальная вместимость V_{z_f} – объем колокола от наинизшей горизонтальной плоскости, принятой за начало рабочей части колокола, до горизонтальной плоскости, абсолютная высота которой равна z_f .

Оценка стандартного отклонения (стандартной неопределенности типа А) неисправленной поправками интервальной вместимости колокола до высоты z_f определяется по формуле

$$u_A^2(V_{z_f}) = \sigma_{V_{z_f}}^2 = F_{V_{z_f}} \cdot K_{\delta\tau} \cdot F_{V_{z_f}}^T = \sigma_{\vartheta}^2 \cdot F_{V_{z_f}} \cdot Q \cdot F_{V_{z_f}}^T,$$

где $F_{V_{z_f}} = \left| \frac{\partial \psi_V}{\partial \tau_1} \dots \frac{\partial \psi_V}{\partial \tau_j} \dots \frac{\partial \psi_V}{\partial \tau_k} \right|$ – вектор частных производных от функции (9) по геометрическим параметрам колокола, принимающим участие в вычислении его объема (интервальной вместимости) до абсолютной высоты z_f .

В соответствии с формулой (8), поправка в общую вместимость колокола за радиальные отклонения (поправка за рельеф) поверхности колокола относительно аппроксимирующей поверхности должна быть равна нулю. Однако только такие поправки за рельеф в интервальные вместимости колокола позволят существенно повысить точность воспроизведения объема газа, прошедшего через счетчик.

С учетом большого количества точек, координаты которых определяются лазерным трекером на поверхности колокола, предлагается поправки ΔV_{z_f} за рельеф вычислять по формулам

$$\bar{\vartheta}_{z_f} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{z_f}} \vartheta_i}{n_{z_f}}; \quad (10)$$

$$\Delta V_{z_f} = S_{z_f} \cdot \bar{\vartheta}_{z_f}, \quad (11)$$

где $S_{z_f} = \psi_S(\tau_1 \dots \tau_k, z_f)$ – площадь поверхности колокола до высоты z_f ; $\bar{\vartheta}_{z_f}$ – среднее радиальное отклонение колокола до абсолютной высоты z_f ; n_{z_f} – количество точек на поверхности колокола до абсолютной высоты z_f , координаты которых были определены.

Оценка стандартного отклонения (стандартной неопределенности типа А) площади поверхности колокола до высоты z_f производится по формуле

$$u_A^2(S_{z_f}) = \sigma_{S_{z_f}}^2 = F_{S_{z_f}} \cdot K_{\delta\tau} \cdot F_{S_{z_f}}^T = \sigma_{\vartheta}^2 \cdot F_{S_{z_f}} \cdot Q \cdot F_{S_{z_f}}^T, \quad (12)$$

где $F_{S_{z_f}} = \left| \frac{\partial \psi_S}{\partial \tau_1} \dots \frac{\partial \psi_S}{\partial \tau_j} \dots \frac{\partial \psi_S}{\partial \tau_k} \right|$ – вектор частных производных от площади поверхности колокола до высоты z_f по геометрическим параметрам колокола, принимающим участие в ее вычислении.

Стандартное отклонение среднего радиального отклонения стенки колокола до высоты z_f , которое входит в формулы (10), (11), вычисляется по формуле

$$\sigma_{\bar{\vartheta}_{z_f}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_{z_f}} (\vartheta_i - \bar{\vartheta}_{z_f})^2}{n_{z_f} (n_{z_f} - 1)}}.$$

Стандартное отклонение (неопределенность типа А) поправки ΔV_{z_f} за рельеф вычисляется по формуле

$$u_A(\Delta V_{z_f}) = \sigma_{\Delta V_{z_f}} = \sqrt{\bar{g}_{z_f}^2 \cdot \sigma_{S_{z_f}}^2 + S_{z_f}^2 \cdot \sigma_{\bar{g}_{z_f}}^2}.$$

Исправленная поправкой за рельеф интервальной вместимость колокола до высоты z_f и ее неопределенность вычисляются по формулам

$$\bar{V}_{z_f} = V_{z_f} + \Delta V_{z_f};$$

$$u_A(\bar{V}_{z_f}) = \sqrt{u_A^2(V_{z_f}) + u_A^2(\Delta V_{z_f})}.$$

Для колокола, занимающего приблизительно вертикальное положение, модель измерений (1) имеет вид

$$R = \left((x_1 - x_0 - z_1 \cdot \sin \beta_x)^2 \cdot \cos^2 \beta_x + (y_1 - y_0 - z_1 \cdot \sin \beta_y)^2 \cdot \cos^2 \beta_y \right)^{1/2},$$

где R – средний внутренний радиус цилиндрической части колокола; x_0, y_0 – горизонтальные координаты точки на оси колокола при $z_0 = 0$; β_x, β_y – углы наклона оси колокола в проекции на плоскости координат xz и yz .

Для вертикального колокола в формулах вычисления его интервальных вместимостей (9) и площади поверхности из (11), (12) вытекает, что из пяти геометрических параметров, которые были определены, участвуют только следующие:

$$V_{z_f} = \pi \cdot R^2 \cdot \sqrt{1 + \text{tg}^2 \beta_x + \text{tg}^2 \beta_y} \cdot z_f = \pi \cdot R^2 \cdot \sqrt{1 + \eta^2} \cdot z_f; \quad (13)$$

$$S_{z_f} = \pi \cdot R \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \text{tg}^2 \beta_x + \text{tg}^2 \beta_y} \right) \cdot z_f = \pi \cdot R \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \eta^2} \right) \cdot z_f; \quad (14)$$

где $\eta = \text{tg} \beta = \sqrt{\text{tg}^2 \beta_x + \text{tg}^2 \beta_y}$ – наклон оси цилиндра.

Обработка результатов измерений, проведенных описанным выше прибором с применением опи-

санного математического аппарата, показала, что основной вклад в формирование неопределенности геометрических параметров и интервальных вместимостей колокола вносит точность его изготовления. Стандартное отклонение реальной поверхности колокола от аппроксимирующего цилиндра составило 546 мкм. Максимальные радиальные отклонения на сварном шве достигают 1 мм (на остальной поверхности – до 0,5 мм). То есть вклад неопределенности измерений трекером в 20 мкм в суммарную неопределенность пренебрежимо мал по сравнению с вкладом неопределенности изготовления поверхности. Тем не менее, расширенная неопределенность среднего радиуса, оцененная по 490 точкам, принятым к обработке, составляет 23,3 мкм (0,0068 %).

Недостатком проведенных измерений координат точек на внутренней поверхности колокола, находящегося в горизонтальном положении, является то, что реальный наклон оси η неизвестен. Наилучшим вариантом были бы измерения, проведенные трекером в вертикальном положении колокола при известных показаниях прибора, отвечающего за его привязку к отвесной линии. При измерениях, проведенных в приблизительно горизонтальном положении колокола, координаты преобразовывались из декартовой системы координат в цилиндрическую (рис. 1) до тех пор, пока наклон не становился близок к нулю. Вычисленная расширенная неопределенность наклона оси цилиндра составляет 0,0004. Если неизвестен реальный наклон оси колокола η , когда колокол подвешен, его влияние на объем колокола должно быть включено в бюджет неопределенности.

С использованием формул (13) и (14) была составлена градуировочная характеристика колокола, представляющая собой его интервальные вместимости (объемы), вычисленные через 1 см по высоте от упомянутой выше наинизшей плоскости. Минимальная и максимальная поправки за рельеф

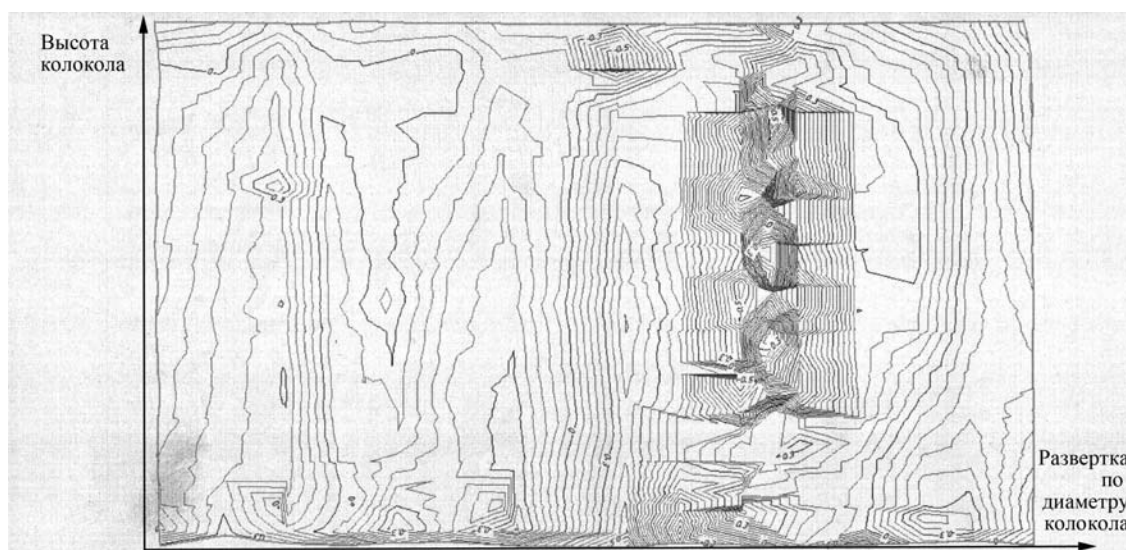


Рис. 2. Развертка внутренней цилиндрической поверхности колокола на плоскость с изолиниями, отображающими рельеф его реальной внутренней поверхности относительно аппроксимирующей

в объем колокола на интервале 1 см, вычисленные по формуле (11), не выходят за границы $\pm 0,06\%$, тогда как на наихудшем интервале в 27 см не выходят за границы $\pm 0,014\%$. С увеличением интервала эта относительная поправка уменьшается и, в соответствии с формулой (9), на всем диапазоне работы колокола будет близка к нулю.

На рис. 2 приведена развертка внутренней цилиндрической поверхности колокола на плоскость. На развертке изолиниями изображен рельеф реальной внутренней поверхности колокола относительно аппроксимирующего цилиндра. Изолинии, отображающие рельеф, построены по радиальным отклонениям опорных точек от цилиндра, вычисленным по формуле (2). На развертке явно выделяется локальная область с большими деформациями, соответствующая сварному шву колокола. Несмотря на то что шов варился в определенной последовательности минимизирующей деформации и тщательно зашлифован, в этом месте имеются значительные (до 1 мм), по сравнению с другими областями внутренней поверхности колокола, отклонения реальной поверхности от аппроксимирующей.

Применение предложенной методики позволило выявить проблемные области внутренней поверхности колокола и внести соответствующие поправки в результаты вычисления интервальных вместимостей при его градуировке.

Выводы

1. Лазерный трекер является прибором, наиболее подходящим для определения геометрических параметров колокола, необходимых для вычисления его интервальных вместимостей.

2. Предложена методика оценки общей и интервальных вместимостей колокола, геометрические параметры поверхностей которых получены из аппроксимации посредством МНК.

3. Геометрические параметры колокола, полученные по результатам аппроксимации, коррелированы между собой, что вызывает необходимость оценки неопределенности интервальных вместимостей с учетом их корреляционной матрицы, полученной с помощью МНК.

4. Предложен универсальный алгоритм вычисления поправок к интервальным вместимостям колокола за отклонение реальной формы поверхностей от аппроксимирующего цилиндра (рельеф).

5. Разработан общий теоретический подход к оценке неопределенности интервальных вместимостей колокола, обеспечивающий адекватные сравнимые результаты независимо от размеров колокола и реальной точности его изготовления, точности геодезических измерений при обмерах, а также расположения и количества точек, координаты которых определены на поверхностях.

Список литературы

1. Комплексная государственная программа энергосбережения Украины, Постановление Кабинета Министров Украины от 05.02.97 г. № 148 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.darom.info/kopleksna_prog_1997_2010.doc
2. *Кремлевский П.П.* Расходомеры и счетчики количества: справочник / П.П. Кремлевский. – Л.: Машиностроение, 1989. – 701 с.
3. *Тракало Б.И.* Проливные установки УВЛ: пути автоматизации процесса поверки счетчиков / Б.И. Тракало, Г.А. Шумский / Проблемы обліку теплоти та води в Україні: VI Міжнар. наук.-практ. конф., 16–19 червня 2008 р., Київ: матеріали. – К.: ТОВ “АВЕГА”, 2008. – С. 125–146.
4. *Бродін Ю.І.* Оцінка точності дзвонівих витратимірювальних установок / Ю.І. Бродін // Український метрологічний журнал. – 1998. – № 3. – С. 48–51.
5. Метрологія. Резервуари сталеві вертикальні циліндричні. Методика повірки: ДСТУ 4147-2003 (ГОСТ 8.570-2000, MOD). – [Чинний від 2003-01-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2002. – 65 с.
6. Метрологія. Резервуари сталеві горизонтальні циліндричні. Методика повірки: ДСТУ 4218:2003 (ГОСТ 8.346-2000, MOD). – [Чинний від 2004-01-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2003. – 52 с.
7. Автоматизированная КИМ. Координатно-измерительная машина TESA MН3D 454 Recorder [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://galika.ru/wp-content/uploads/2013/11/TESA-MН3D-454-Recorder.pdf>
8. Определение вместимости вертикальных стальных резервуаров методом горизонтальных сечений / А.Ю. Второв, А.П. Пигин, Д.В. Чадович, Н.Н. Варванович [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.credo-dialogue.com/getattachment/3df1f4e6-b71f-43a0-8045-9b5fef4d2298/Opredelenie-vmestimosti.aspx>
9. *Самойленко О.М.* Аналіз сучасного стану та перспектив метрологічного забезпечення лазерних трекерів / О.М. Самойленко, Б.Є. Монюк // Вісник геодезії і картографії. – 2012. – № 5. – С. 46–52.
10. *Самойленко А.Н.* Исследование метрологических характеристик горизонтального круга лазерных трекеров FARO X и FARO ION / А.Н. Самойленко, Б.Е. Монюк // Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 5. – (Известия вузов).
11. FARO® Laser Tracker Vantage Возможности, преимущества и технические характеристики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://faro.by/katalog/lazernye-trekery-faro>