

УДК 681.2.089:542.3

КАЛІБРУВАННЯ КОМБІНОВАНИХ, ВСТАНОВЛЕНИХ НА РЕЗЕРВУАРАХ СИСТЕМ ДЛЯ ВИМІРЮВАНЬ МАСИ РІДИН

О. Самойленко, доктор технічних наук, професор, директор науково-виробничого інституту геометричних, механічних та віброакустичних вимірювань, ДП «Укрметртестстандарт», м. Київ

Викладено методику калібрування на місці експлуатації вимірювальних комбінованих систем у складі стаціонарного рівнеміра і вимірювача тиску стовпа рідини, які реалізують непрямий метод вимірювань маси рідин у стаціонарних резервуарах, заснований на гідростатичному принципі. Оцінювання параметрів системи з калібрування та їх невизначеностей, а також невизначеності вимірювань системою маси в експлуатації виконано строго за методом найменших квадратів з урахуванням кореляції результатів вимірювань та визначених параметрів системи вимірювань маси

In this article is presented your attention calibration method of the measuring systems for the mass of the liquids in tanks in

the place of the exploration. Systems consist of level gauges and devices for measuring hydrostatic pressure of liquid. Calibration is performing to measure the level of liquid from dip-point and density of liquid by measuring standards simultaneously with measure of vertical distance from reference point of the level gauge to liquid surface and hydrostatic pressure of liquid by system. Measurement results are adjusted by list square solution method and after that obtained geometrical and other parameters (biases) of the system. Parameters (biases) enter to system like that correction. Uncertainty evaluation is performing for parameters of the system and for liquid mass in exploration strict by list square method with considers correlation between parameters and results of measurement.

Ключові слова: калібрування, невизначеність, резервуар, гідростатичний тиск, густина, рівень, об'єм, маса рідини.
Keywords: Calibration, uncertainty, tank, hydrostatic presser, density, level, volume, mass of the liquid.

Проблему підвищення точності обліку нафти та нафтопродуктів важко переоцінити. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є створення автоматизованих систем контролю й обліку кількості нафти та нафтопродуктів на стаціонарних вимірювальних резервуарах (систем). Найважливішим питанням забезпечення надійної експлуатації таких систем є розроблення дієвих методів вимірювань у процесах оцінювання їх відповідності та калібрування в експлуатації, а також методів опрацювання результатів цих вимірювань. Складність організації процесу вимірювань під час калібрування полягає в тому, що вимірювання необхідно виконати без демонтажу приладів, що входять до системи, на резервуарі за реальних умов їх експлуатації.

Одним із методів вимірювань маси нафти та нафтопродуктів у резервуарах є регламентований OIML R 125 [1], ISO 15169 [5] та ДСТУ 7094 (ГОСТ 8.587) [8] непрямий метод вимірювань у стаціонарних резервуарах, заснований на гідростатичному принципі. Для його реалізації на резервуарі повинні бути встановлені стаціонарний рівнемір, який відповідає вимогам [2] і [5], та вимірювач тиску стовпа рідини, який відповідає вимогам [5]. Для введення до результатів вимірювань та обчислень певних поправок на температуру та обчислення об'єму рідини, приведеного до температури 15 чи 20 °C, повинна бути встановлена низка датчиків температури, що вимірюють температури рідини та пароповітряної суміші за всією висотою резервуара з кроком, наприклад, один метр.



Густина рідини при цьому визначається за виміряними тиском стовпа рідини над чутливим елементом убудованого в резервуар вимірювача тиску та рівнем рідини над чутливим елементом, виміряним стаціонарним рівнеміром, змонтованим на резервуарі. За рівнем рідини визначається її об'єм за градуовальною таблицею резервуара. Маса визначається множенням фактично виміреної густини рідини на приведений до температури вимірювань її об'єм (формула (1)).

Перевагою застосування такого комплексу приладів та такого методу вимірювань є постійне й оперативне визначення температури, об'єму (в тому числі приведенного), густини і маси рідини, що в певний момент міститься в резервуарі, але для задоволення прийнятної невизначеності вимірювань маси такою системою необхідно виконання ряду вимог до неї. Представимо основні з них.

1. Усі засоби вимірювальної техніки, що використовуються в системі, повинні мати відповідні метрологічні характеристики (див., наприклад, [5]), щоби забезпечити необхідну точність обчислення маси рідини у 0,5 % за [1] та [8].

2. Резервуар повинен бути повірений (відкалібрований) за [10], що забезпечить визначення його інтервальних місткостей відносно точки торкання днища вантажем рулетки (термін із [10]), що те ж саме відносно *dip-point* (терміни із [3] та [6]).

3. Потрібно з достатньою невизначеністю вимірити базові висоти рівнеміра і вимірювача тиску як відстані за вертикаллю від точки торкання днища вантажем рулетки до реперної точки стаціонарного рівнеміра та до чутливого елемента вимірювача тиску стовпа рідини.

4. Резервуар повинен бути достатньо жорстким, щоби перераховані у п. 3 відстані не змінювалися за його наповнення та у часі в період експлуатації системи.

Щоби не розпилювати уваги і зосередитися на викладені методики калібрування системи, в межах цієї публікації приймається, що зміна температури як рідини, так і повітря за калібрування незначна, і впливом від цієї зміни на кінцевий результат калібрування системи можна знехтувати. Питання впливу зміни температури в межах діапазону температури експлуатації системи підлягає окремому розгляду. На цьому етапі розгляду також можна вважати, що зміни тиску пароповітряної суміші в резервуарі та атмосферного тиску враховуються з належною точністю.

Досвід показує, що п. 4 наведеного вище переліку виконується далеко не завжди і може призвес-

ти до значного збільшення невизначеності вимірювань маси. Виконання п. 3 з достатньою точністю, само по собі, не є надто простою задачею навіть під час введення резервуара в експлуатацію, а в процесі експлуатації резервуара з системою стає просто неможливою без опорожнення, зачистки і дегазації резервуара. Але навіть після таких зусиль результати прямих визначень за п. 3 можуть бути спотворені деформаціями резервуара під вагою налитої у нього рідини і у часі від нерівномірного осідання його основи.

У *OIML R 125* [1] наводяться загальні метрологічні та технічні вимоги щодо визначення маси рідин вимірювальними системами, встановленими на резервуарах. Фактично в [1] йдеться стосовно непрямого методу вимірювань маси у стаціонарних резервуарах, заснованого на гідростатичному принципі, шляхом застосування рівнеміра і вимірювача тиску стовпа рідини. Ніякої мови щодо калібрування описаної в [1] системи не йдеться. Не йдеться також стосовно строгого, з точки зору методу найменших квадратів (МНК), методу опрацювання результатів вимірювань та оцінювання невизначеності. Є наближені формули для обчислення маси рідини у резервуарі та спрощені формули для обчислення її відносної невизначеності. Установлено допустиме значення визначення маси рідини в резервуарі у 0,5 %. В [1] є суттєва неточність у загальній формулі обчислення маси. Необхідно, замість зазначених там площ горизонтального поперечного перетину на висоті рівня налитої в резервуар рідини та на висоті рівня вимірювача тиску, в формулу обчислення маси підставляти усереднену за всією висотою на певну висоту площу поперечного перетину. Ця площа, власне, може бути легко визначена з градуовальної таблиці резервуара діленням зазначеної там місткості на висоту рівня рідини в резервуарі.

ISO 15169 [5], більш докладно ніж [1], викладає відомості та вимоги щодо визначення об'єму, густини та маси рідини у вертикальних циліндричних резервуарах за допомогою комбінованих резервуарних вимірювальних систем, склад яких описано вище. Указано максимальні допустимі похибки вимірювань висоти рівня, гідростатичного тиску та температури.

У [5] описано організацію повірки (застосовується термін «верифікація», який також має сенс налаштування) окремих складових системи під час введення її в експлуатацію та в процесі експлуатації, наприклад, для рівнемірів щодо повірки в процесі експлуатації йде посилання на [7].

Наведено більш докладні ніж в [1] формули для обчислення об'єму та маси рідини. Велику увагу

прیدілено оцінюванню невизначеності результатів вимірювань для вертикальних та горизонтальних циліндричних, а також сферичних резервуарів, але наведені у [5] формули не передбачають використання результатів калібрування системи та не враховують корельованості параметрів системи та результатів вимірювань. Для вимірювачів тиску стовпа рідини передбачено процедуру визначення похибки нуля (*zero error*) та похибки лінеаризації (*linearity error*) перетворювачів тиску (*pressure transmitter*). Разом з тим за ходом викладення ці поняття у [5] чітко не розділяються на систематичні зміщення (*biases*) та їх невизначеності, й не ясно, як вони визначаються, але йде посилання на [8]. Саме стосовно їх визначення і йтиметься у цій роботі.

В ДСТУ 7094 (ГОСТ 8.587) [9] коротко описано непрямий метод вимірювань маси у стаціонарних резервуарах, заснований на гідростатичному принципі. Наведено також формули для обчислення маси рідини та границь допустимої відносної похибки вимірювань маси і встановлені границі допустимої похибки вимірювань маси таким методом у 0,5 %, але не йдеться щодо будь-яких методів калібрування вимірювальних систем.

Незважаючи на те, що у наведених вище роботах застосовується різна термінологія, фактично йдеться стосовно тих самих систем для вимірювань маси, які надалі в тексті узагальнено називатимуть системами.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Із докладного аналізу означених вище й інших чинників впливає, що демонтаж рівнеміра і вимірювача тиску й їх окреме калібрування (повірка) не має сенсу. Хіба що перед установленням і введенням в експлуатацію на резервуарі, але це не виключає означені нижче процедури перед введенням в експлуатацію на резервуарі. Виходячи з вимоги калібрування без демонтажу пропонуються такі еталони і методика вимірювань ними.

Для виконання оцінювання відповідності, повірки чи калібрування системи необхідно мати еталонний рівнемір, який установлюється на люку над точкою торкання днища вантажем рулетки, і еталонний густиномір, установлений на іншому люку (можлива комбінація двох приладів в одному). Обидва прилади можуть мати еталонний канал вимірювання температури. Під час калібрування резервуар наповнюється рідиною чи рідиною із нього зливається. На певних висотах рівня рідини наливання (зливання) зупиняється, і вимірюється висота рівня рідини від точки торкання днища вантажем рулетки до поверх-

ні еталонним рівнеміром, густина в декількох шарах рідини еталонним густиноміром, а також відстань від реперної точки стаціонарного рівнеміра до поверхні рідини та тиск стовпа рідини, вимірний вимірювачем тиску. Таких точок вимірювань повинно бути не менше 10, рівномірно розташованих за висотою вимірювань рівня в діапазоні вимірювань системою. Якщо за попереднім досвідом рідина однорідна, то можна допустити вимірювання густини в лабораторії за відібраним зразком та виміреною температурою, як це рекомендовано у [5].

Зважаючи на наведене вище, математичну модель вимірювань маси нафти чи нафтопродукту в резервуарі потрібно записати в такому виді:

$$M_i = \rho_i \cdot V_i, \quad (1)$$

де ρ_i — густина рідини, вимірена системою;

V_i — об'єм рідини, проінтерпольований системою за виміреним рівнем рідини в резервуарі за градуювальною таблицею введеною в неї, приведений до середньої температури рідини в резервуарі за формулами із [5].

Для спрощення у формулі (1) на цьому етапі не розділяється обчислення маси над чутливим елементом (наприклад, мембраною) вимірювача тиску та нижче нього, як це зроблено, наприклад, у [1].

Густина рідини в резервуарі в процесі його експлуатації обчислюється за результатами вимірювань тиску та рівня рідини над чутливим елементом вимірювача тиску. Теоретично густина рідини в резервуарі ρ_i повинна розраховуватися за формулою:

$$\rho_i = P_i / g \cdot H_i, \quad (2)$$

де H_i — висота рівня рідини, вимірена рівнеміром, установленим на резервуарі над чутливим елементом вимірювача тиску;

P_i — тиск стовпа рідини, вимірний вимірювачем тиску, встановленим на резервуарі, коли рівень рідини в резервуарі був H_i ;

g — прискорення вільного падіння, яке беруть таким, що дорівнює 9,8066 м/с².

Унаслідок зазначених вище й інших причин рівняння (2) непридатне для обчислення густини рідини в резервуарі з достатньою точністю. З метою уточнення рівняння (2) за результатами калібрування вимірювальної системи пропонується така модель вимірювань у виді системи двох рівнянь:

$$\tilde{\rho}_i = \frac{P_i - (P_0 + c_p \cdot P_i)}{g \cdot ((H_L + c_{H_L} \cdot L_i) - (H_p + c_{H_p} \cdot L_i) - L_i)}; \quad (3)$$

$$\tilde{H}_{G_i} = (H_L + c_{H_L} \cdot L_i) - L_i, \quad (4)$$

де у формулах є дві групи величин:

1) *вимірені для кожної висоти рівня рідини величини:*

\tilde{H}_i — висота рівня рідини в резервуарі, вимірена еталонним рівнеміром над точкою торкання днища резервуара вантажем рулетки, яка співпадає з нулем градуовальної таблиці резервуара за результатами його калібрування;

$\tilde{\rho}_i$ — середня густина рідини в резервуарі, вимірена еталонним густиноміром, коли рівень рідини в резервуарі був \tilde{H}_i ;

L_i — вимірена стаціонарним рівнеміром відстань від реперної точки рівнеміра (точка рівнеміра, з якою співпадає нуль його шкали) до поверхні рідини;

P_i — вимірений вимірювачем тиск стовпа рідини;
2) невідомі параметри системи:

P_0 — адитивне систематичне зміщення (*bias*) результатів вимірювань тиску вимірювачем тиску стовпа рідини, встановленим на резервуарі (аналог того, що у [5] названо похибкою нуля);

c_p — мультиплікативне систематичне зміщення (*bias*) результатів вимірювань тиску вимірювачем тиску стовпа рідини в резервуарі (аналог того, що у [5] названо похибкою лінеаризації);

H_L — базова висота рівнеміра — висота реперної точки рівнеміра над точкою торкання днища резервуара вантажем рулетки за рівня рідини, що дорівнює нулю;

c_{H_L} — мультиплікативне систематичне зміщення (*bias*) висоти реперної точки стаціонарного рівнеміра відносно точки торкання днища вантажем рулетки;

H_p — базова висота вимірювача тиску — висота чутливого елемента вимірювача тиску стовпа рідини в резервуарі над точкою торкання днища резервуара вантажем рулетки за рівня рідини, що дорівнює нулю;

c_{H_p} — мультиплікативне систематичне зміщення (*bias*) висоти чутливого елемента вимірювача тиску відносно точки торкання днища вантажем рулетки;
 $i = 1, \dots, n$ — номер рівня рідини, на якому виконувалися вимірювання;

n — кількість рівнів рідини, на яких виконувалися вимірювання.

Невідомі c_{H_L} і c_{H_p} характеризують зміну за лінійним законом базових висот рівнеміра та вимірювача тиску залежно від висоти рівня налитої в резервуар рідини.

Зважаючи на те, що всі вимірювання виконуються з певною невизначеністю, а необхідні для коректної роботи системи параметри точно невідомі, рівняння (3) і (4) точно виконуватися не будуть. Ці рівняння залежні між собою, оскільки в обох фігурують вимірене рівнеміром системи значення відста-

ні до поверхні рідини і базова висота рівнеміра системи над точкою торкання днища вантажем рулетки та його мультиплікативне систематичне зміщення. Зважаючи на це, виникає складний випадок вимірювання результатів вимірювань за МНК.

Для складання рівнянь поправок необхідно розкласти функції (3) і (4) в ряд Тейлора, обмежившись першими лінійними членами. Фактично операція зводиться до взяття частинних похідних від функцій по виміреним величинам і визначуваним параметрам.

Вихідні функції (3) і (4), що пов'язують вимірені величини та визначувані геометричні та інші параметри системи, в загальному випадку мають вид:

$$\begin{aligned} y_{1i} &= \varphi_{1i}(x_1, \dots, x_m, \tau_1, \dots, \tau_k); \\ y_{2i} &= \varphi_{2i}(x_1, \dots, x_m, \tau_1, \dots, \tau_k), \end{aligned} \quad (5)$$

де y_{1i} та y_{2i} — результати вимірювань густини та висоти рівня рідини еталонними приладами;

x_1, \dots, x_n — результати вимірювань відстані від реперної точки рівнеміра до поверхні рідини і тиску стовпа рідини вимірювачем тиску системи;

τ_1, \dots, τ_k — визначувані геометричні та інші параметри системи (систематичні зміщення);

k — кількість визначуваних геометричних та інших параметрів системи;

m — кількість вимірювань, які виконуються системою на одному рівні рідини.

Система рівнянь поправок для функції (5) у загальному матричному виді записується так:

$$A \cdot V = B \cdot \delta\tau + l, \quad (6)$$

де A — матриця частинних похідних від вихідних функцій (5) по виміреним величинам;

B — матриця частинних похідних від вихідних функцій (5) по параметрах системи, що визначаються;

V — матриця поправок до вимірених величин;
 $\delta\tau$ — вектор поправок до наближених значень параметрів системи, що визначаються;

l — вектор вільних членів.

Для складання системи нормальних рівнянь уведемо деякі узагальнені проміжні величини u_{i1} та u_{i2} . Вони відповідають кожній парі рівнянь (3) і (4). Тоді маємо в загальному виді (5):

$$A \cdot V = U = \begin{pmatrix} u_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ u_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & u_{i1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & u_{i2} & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & u_{n1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & u_{n2} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$\text{де } \begin{pmatrix} u_{i1} \\ u_{i2} \end{pmatrix} = A_i \cdot V_i = \begin{pmatrix} a_{i11} & 0 & a_{i13} & a_{i14} \\ 0 & a_{i22} & 0 & a_{i24} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v_{\tilde{p}_i} & 0 \\ 0 & v_{\tilde{H}_i} \\ v_{P_i} & 0 \\ v_{L_i} & v_{L_i} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Коефіцієнти лівої частини рівнянь поправок (6) та у формулі (8) такі:

$$a_{i11} = 1; \quad a_{i13} = \frac{\tilde{\rho}_i}{P_i}; \quad a_{i14} = \frac{\tilde{\rho}_i}{H_i};$$

$$a_{i22} = 1; \quad a_{i24} = 1,$$

де $H_i = H_L^0 - H_P^0 - L_i$ — наближене значення рівня рідини над чутливим елементом вимірювача тиску стовпа рідини;

$v_{\tilde{p}_i}, v_{\tilde{H}_i}, v_{P_i}, v_{L_i}$ — поправки до вимірюваних значень густини, рівня, тиску та відстані до поверхні рідини.

Тоді рівняння (6) матиме вид $U = B\delta\tau + l$. Більш докладно частину рівняння поправок стосовно визначуваних невідомих параметрів, для кожної висоти рівня, на якій виконувалися вимірювання, можна записати так:

$$B_i \cdot \delta\tau = \begin{pmatrix} b_{i11} & b_{i12} & b_{i13} & b_{i14} & b_{i15} & b_{i16} \\ 0 & 0 & b_{i23} & b_{i24} & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \delta P_0 \\ \delta c_P \\ \delta H_L \\ \delta c_{H_L} \\ \delta H_P \\ \delta c_{H_P} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

де коефіцієнти правої частини рівнянь поправок (6)

$$b_{i11} = -\tilde{\rho}_i / P_i; \quad b_{i12} = \tilde{\rho}_i; \quad b_{i13} = \tilde{\rho}_i / H_i;$$

$$b_{i14} = (\tilde{\rho}_i / H_i)L_i; \quad b_{i15} = -\tilde{\rho}_i / H_i; \quad b_{i16} = -(\tilde{\rho}_i / H_i)L_i; \\ b_{i23} = 1; \quad b_{i24} = L_i.$$

Вільні члени рівнянь поправок отримуємо, підставляючи у рівняння (3) і (4) безпосередньо вимірені величини та наближені значення визначуваних параметрів системи, зважаючи, що чотири із них можна прийняти такими, що дорівнюють нулю:

$$l_i = P_i / (g \cdot (H_L^0 - H_P^0 - L_i)) - \tilde{\rho}_i; \\ l_{2i} = H_L^0 - L_i - \tilde{H}_{G_i}. \quad (10)$$

Нульовий верхній індекс визначуваних параметрів у рівняннях (10) означає, що беруться наближені значення параметрів.

Для виключення викривлень під час опрацювання треба коректно, з точки зору МНК, розрахувати ваги величин u_{i1} та u_{i2} .

Обернена вага пари узагальнених поправок u_{i1} та u_{i2} обчислюється за формулою:

$$Q_{u_i} = A_i \cdot q_i \cdot A_i^T = \begin{pmatrix} Q_{u_{i1}} & K_{u_i} \\ K_{u_i} & Q_{u_{i2}} \end{pmatrix} = \\ = \begin{pmatrix} a_{i11} & 0 & a_{i13} & a_{i14} \\ 0 & a_{i22} & 0 & a_{i24} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} q_{\tilde{p}_i} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_{\tilde{H}_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_{P_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_{L_i} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_{i11} & 0 \\ 0 & a_{i22} \\ a_{i13} & 0 \\ a_{i14} & a_{i24} \end{pmatrix}, \quad (11)$$

де q_i — діагональна матриця обернених ваг для вимірюваних величин у точці вимірювань (на висоті рівня рідини) з номером i .

Діагональні члени матриці q_i обчислюються за формулами:

$$q_{\tilde{p}_i} = u^2(\tilde{\rho}_i) / \sigma^2(\tilde{\rho}_0) — обернена вага виміреної еталонним густиноміром густини;$$

$q_{\tilde{H}_i} = u^2(\tilde{H}_i) / \sigma^2(\tilde{H}_0) — обернена вага виміреного еталонним рівнеміром рівня рідини від точки торкання днища вантажем рулетки;$

$q_{P_i} = u^2(P_i) / \sigma^2(P_0) — обернена вага виміреного тиску стовпа рідини в резервуарі вимірювачем тиску системи;$

$q_{L_i} = u^2(L_i) / \sigma^2(L_0) — обернена вага виміреної рівнеміром системи відстані від його реперної точки до поверхні рідини,$

де $\sigma^2(\tilde{\rho}_0), \sigma^2(\tilde{H}_0), \sigma^2(P_0), \sigma^2(L_0) — дисперсії деяких узагальнених вимірювань, вага яких прирівнюється одиниці.$

Матриця ваг величин u_{i1} та u_{i2} , розміром 2 на 2, обчислюється оберненням матриці Q_{u_i} за формулою:

$$P_{u_i} = \begin{pmatrix} Q_{u_{i1}} & K_{u_i} \\ K_{u_i} & Q_{u_{i2}} \end{pmatrix}^{-1}. \quad (12)$$

Матриця ваг P_U для всієї сукупності вимірювань має діагональний вид і складається з блоків (12) розміром 2 на 2, розташованих на її діагоналі.

Система нормальних рівнянь матиме відомий вид: $N\delta\tau + L = 0$, де $N = B^T P_U B$ — квадратна матриця коефіцієнтів нормальних рівнянь, $L = B^T P_U l$ — вектор вільних членів нормальних рівнянь.

Нормальні рівняння у загальному виді розв'язуються за схемою:

$$\delta\tau = -N^{-1} \cdot L = -Q \cdot L, \quad (13)$$

де $N^{-1} = Q$ — матриця, обернена до матриці нормальних рівнянь.

Нормальні рівняння розв'язуються за головною умовою МНК:

$$U^T P_U U = \min \text{ або } V^T P V = \min. \quad (14)$$

де P — матриця ваг безпосередніх вимірювань, яка складається із блоків, обернених до q_i .

Після розв'язання нормальних рівнянь поправки до вимірюваних величин обчислюються за формулою:

$$V_i = q_i \cdot A_i \cdot P_{u_i} \cdot \begin{pmatrix} u_{i1} \\ u_{i2} \end{pmatrix} \text{ або}$$

$$\begin{pmatrix} v_{\tilde{p}_i} \\ v_{\tilde{H}_i} \\ v_{P_i} \\ v_{L_i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} q_{\tilde{p}_i} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_{\tilde{H}_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_{P_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_{L_i} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_{i11} & 0 \\ 0 & a_{i22} \\ a_{i13} & 0 \\ a_{i14} & a_{i24} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Q_{u_{i1}} & K_{u_i} \\ K_{u_i} & Q_{u_{i2}} \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} u_{i1} \\ u_{i2} \end{pmatrix}. \quad (15)$$

У [4] описано найбільш простий випадок оцінювання невизначеності результатів вимірювань.

Опрацювання й оцінювання за МНК є складним випадком, який потребує ретельного, заснованого на [4], розроблення для кожного окремого випадку, такого, як наведено нижче.

Оцінювання невизначеності за МНК розпочинається з оцінювання стандартного відхилення одиниці ваги σ_u за формулою:

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{U^T P_U U}{2n - k}} = \sqrt{\frac{V^T P V}{2n + nm - k}}. \quad (16)$$

Значення $V^T P V$ у чисельнику правої частини формули (16) можна обчислити за виразом:

$$V^T P V = \sum_{i=1}^n \left(\begin{array}{cccc|cccc} p_{\bar{v}_i} & 0 & 0 & 0 & v_{\bar{v}_i} & & & \\ 0 & p_{\bar{h}_i} & 0 & 0 & v_{\bar{h}_i} & & & \\ 0 & 0 & p_{P_i} & 0 & v_{P_i} & & & \\ 0 & 0 & 0 & p_{L_i} & v_{L_i} & & & \end{array} \right). \quad (17)$$

Стандартне відхилення σ_u — це відхилення такого вимірювання, вага якого дорівнює одиниці: $p_i = 1 / q_i = \sigma^2(x_0) / u^2(x_i) = 1$.

Таке значення стандартного відхилення включає як невизначеності еталонів, застосованих для калібрування, так і невизначеності вимірювань самою системою за калібрування.

Оцінки невизначеності за типом А визначуваних параметрів системи обчислюються за формулою:

$$\sigma_A(\tau_j) = \sigma_u \cdot \sqrt{Q_{jj}}, \quad (18)$$

де Q_{jj} — діагональні члени матриці, оберненої до матриці нормальних рівнянь із (13), що відповідають шести визначуваним параметрам системи.

Параметри системи, під якими розуміються її систематичні зміщення, обчислені за розв'язанням наведеної вище системи рівнянь, повинні бути занесені до вимірювальної системи як поправки. Математична модель, за якою працює система в експлуатації, повинна відповідати математичній моделі, за якою проводилося калібрування, тобто повинна відповідати формулам (3) та (4). Для повноти викладення повторимо ці формули з корекцією, необхідною в експлуатації:

$$\rho_t = \frac{P_t - (P_0 + c_p \cdot P_t)}{g \cdot ((H_L + c_{H_L} \cdot L_t) - (H_p + c_{H_p} \cdot L_t) - L_t)}; \quad (19)$$

$$H_{G_t} = (H_L + c_{H_L} \cdot L_t) - L_t, \quad (20)$$

де ρ_t — вимірена (обчислена із правої частини рівняння (19)) густина;

H_{G_t} — вимірена (обчислена із правої частини рівняння (20)) висота рівня рідини;

t — індекс, який вказує на порядковий номер вимірювання маси рідини у резервуарі в експлуатації.

Формули (19) і (20) відрізняються від (3) і (4) тим, що в них підставляються визначені із калібрування параметри системи та вимірені в експлуатації величини, а обчислені ліві частини вважаються результатами вимірювань системою.

Для оцінювання невизначеності вимірювання системою маси рідини, що міститься в резервуарі, повинна бути складена математична модель для такого оцінювання. Як було вже зазначено вище, в [1] та [5] наведено спрощені апіорні моделі оцінювання невизначеності вимірювань маси системами, які не враховують результатів калібрування системи і корельованості параметрів системи та результатів вимірювань нею.

На першому етапі оцінювання невизначеності вимірювань маси необхідно оцінити невизначеності вимірювань густини і рівня рідини, які обчислюються за формулами (19) і (20). Для цього необхідно отримати кореляційну матрицю результатів вимірювань густини та рівня з урахуванням результатів калібрування за формулами:

$$K_{\rho H} = \begin{vmatrix} u_A^2(\rho_t) & K_{12} \\ K_{21} & u_A^2(H_{G_t}) \end{vmatrix} = B_t \cdot K_\tau \cdot B_t^T + A_t \cdot K_x \cdot A_t^T; \quad (21)$$

$$A_t \cdot K_x \cdot A_t^T =$$

$$= \begin{vmatrix} a_{t13} & a_{t14} \\ 0 & a_{t24} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} u^2(P_t) & 0 \\ 0 & u^2(L_t) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} a_{t13} & 0 \\ a_{t14} & a_{t24} \end{vmatrix}; \quad (22)$$

$$B_t = \begin{vmatrix} b_{t11} & b_{t12} & b_{t13} & b_{t14} & b_{t15} & b_{t16} \\ 0 & 0 & b_{t23} & b_{t24} & 0 & 0 \end{vmatrix}, \quad (23)$$

де $K_\tau = \sigma_u^2 \cdot Q$ — кореляційна матриця визначених із калібрування параметрів системи;

B_t — вектор коефіцієнтів вагової функції, який збігається з матрицею коефіцієнтів рівнянь поправок (9), обчислених для висоти рівня рідини в резервуарі, позначеного індексом t ;

$a_{t13}, a_{t14}, a_{t24}$ — коефіцієнти із матриці коефіцієнтів (8), обчислені для висоти рівня рідини в резервуарі, позначеного індексом t ;

$u(P_t), u(L_t)$ — невизначеності вимірювань системою тиску стовпа рідини та відстані до поверхні рідини під час експлуатації для висоти рівня рідини в резервуарі, позначеного індексом t .

Для оцінювання невизначеності вимірювань маси рідини в резервуарі запишемо формулу (1) у виді:

$$M_t = \rho_t \cdot V_t = \rho_t \cdot H_{G_t} \cdot S_t, \quad (24)$$

де S_t — усереднена за всією висотою на певну висоту площа поперечного перетину резервуара, отримана діленням місткості з градувальної таблиці на висоту рівня рідини H_{G_t} .

Для обчислення невизначеності вимірювань маси рідини із урахуванням кореляції необхідно

скласти вагову функцію:

$$u^2(M_t) = F_M \cdot K_{\rho H} \cdot F_M^T =$$

$$= \begin{vmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} u_A^2(\rho_t) & K_{12} & 0 \\ K_{21} & u_A^2(H_{G_t}) & 0 \\ 0 & 0 & u_A^2(S_t) \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} f_{11} \\ f_{12} \\ f_{13} \end{vmatrix}; \quad (25)$$

$$\begin{vmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} H_{G_t} \cdot S_t & \rho_t \cdot S_t & \rho_t \cdot H_{G_t} \end{vmatrix}, \quad (26)$$

де f_{11} , f_{12} та f_{13} — коефіцієнти вагової функції, отримані як частинні похідні від рівняння (24) по виміреному густині, рівню і площі горизонтального перетину резервуара;

$u^2(S_t)$ — невизначеність площі, яка визначається з рівняння $u^2(S_t)/S_t^2 = u^2(V_t)/V_t^2$, тобто відносна невизначеність площі дорівнюється відносній невизначеності місткості із повірки (калібрування) резервуара.

Якщо невизначеність маси записати у відносній мірі у виді очевидної та відомої формули:

$$\frac{u^2(M_t)}{M_t^2} = \frac{u^2(\rho_t)}{\rho_t^2} + \frac{u^2(V_t)}{V_t^2} + \frac{u^2(H_{G_t})}{H_{G_t}^2}, \quad (27)$$

то треба мати на увазі, що це наближена формула, яка не враховує корельованості вимірювань.

Реальна модель вимірювань буде складнішою, адже вона може бути нелінійною, можливо прийдемо враховувати гістерезис, що виникатиме під час на-

ливання та зливання рідини, та враховувати вплив температури рідини, наприклад, на вимірювач тиску.

ВИСНОВКИ


Запропонована методика дозволяє виконати калібрування без демонтажу складових системи на місці експлуатації та строго, з точки зору МНК, оцінити параметри вимірювальної комбінованої системи у складі рівнеміра та вимірювача тиску стовпа рідини, призначеної для вимірювання маси нафти та нафтопродуктів у резервуарах.

Методика також дозволяє строго за МНК, із урахуванням корельованості, оцінити невизначеність параметрів вимірювальної комбінованої системи та невизначеність обчислення густини та маси нафти чи нафтопродукту в резервуарі під час експлуатації.

Параметри системи, визначені із калібрування, є, фактично, її систематичними зміщеннями, які повинні вводитися у систему як поправки, що значно поліпшить результати вимірювань маси в експлуатації.

Можуть бути запропоновані інші математичні моделі вимірювань, які більш адекватно описують фактичні параметри системи, але запропонована методика вимірювань та оцінювання за МНК може бути універсальною для будь-яких моделей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

- OIML R 125:1998 (E) Measuring systems for the mass of liquids in tanks.
- OIML R 85:2008 Automatic level gauges for measuring the level of liquid in stationary storage tanks. Part 1: Metrological and technical requirements; Part 2: Metrological control and tests.
- OIML R 71:2008 Fixed storage tanks. General requirements.
- JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement.
- ISO 15169:2003 Petroleum and liquid petroleum products — Determination of volume, density and mass of the hydrocarbon content of vertical cylindrical tanks by hybrid tank measurement systems.
- ISO 7507-4:2010 Petroleum and liquid petroleum products — Calibration of vertical cylindrical tanks — Part 4: Internal electro-optical distance-ranging method.
- ISO 4266-1:2002 Petroleum and liquid petroleum products — Measurement of level and temperature in storage tanks by automatic methods — Part 1: Measurement of level in atmospheric tanks.
- ISO 11223-1:1995 Petroleum and liquid petroleum products — Direct static measurements — Contents of vertical storage tanks — Part 1: Mass measurement by hydrostatic tank gauging.
- ДСТУ 7094:2009 Маса нафти та нафтопродуктів. Загальні вимоги до методик виконання вимірювань (ГОСТ 8.587-2006, MOD).
- ДСТУ 7473:2016 Метрологія. Резервуари стаціонарні вимірювальні вертикальні. Методика повірки (калібрування) геометричним методом із застосуванням геодезичних приладів. 

Отримано / received: 26.10.2017.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. М.Д. Гераймчуком (Україна).
Prof. M.D. Geraimchuk, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.