

## МЕТОДИ І ПРИЛАДИ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ РІДКОЇ І ГАЗОПОДІБНОЇ ФАЗ

УДК 006.91:681.121

DOI: 10.31471/1993-9981-2021-2(47)-34-45

### ВИЗНАЧЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРУБОПОРШНЕВИХ ПОВІРОЧНИХ УСТАНОВОК НА ОСНОВІ КОНЦЕПЦІ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

*Т. В. Кенещук*

*Державне підприємство «Івано-Франківськстандартметрологія»*

*76007, м.Івано-Франківськ, вул.Вовчинецька, 127, тел./факс: (0342)53-02-00, (0342)53-56-21, e-mail: ktv.metr77@gmail.com*

У роботі відмічено, що для визначення кількості нафти застосовуються вузли обліку нафти. На вузлах обліку нафти, що реалізують метод динамічних вимірювань, кількість нафти визначається за показами лічильників нафти (турбінних або масових витратомірів). Такі перетворювачі витрати (витратоміри-лічильники) у процесі експлуатації підлягають повірці. Основними еталонними засобами, що застосовуються для повірки перетворювачів витрати, є трубопоршневі повірочні установки (ТПУ). Калібрування таких еталонних установок може проводитися із застосуванням еталонних мірників, еталонних ваг та за допомогою еталонної трубопоршневої установки (компакт-прувера) з компаратором. Розроблено методики калібрування ТПУ з застосуванням еталонних мірників, а також еталонного компакт-прувера з компаратором, що пройшли апробацію та застосовуються при калібруванні еталонних трубопоршневих установок, які експлуатуються на об'єктах АТ «Укртранснафта». Розглянуто метод, а також наведено структурну схему калібрування ТПУ за допомогою еталонного компакт-прувера з компаратором. Складено математичну модель з врахуванням впливових факторів та алгоритмів їх оцінювання, а також визначено метрологічні характеристики ТПУ - сформовано бюджет невизначеності та здійснено оцінювання невизначеності вимірювання місткості трубопоршневої повірочної установки при проведенні її калібрування за допомогою еталонного компакт-прувера з компаратором. За результатами калібрування ТПУ ВНР -1100 фірми "VEGYEPSZER", Угорщина, що експлуатується у Філії «ПДМН» АТ «Укртранснафта» (м. Кременчук) із застосуванням еталонного компакт-прувера Compact Prover фірми Brooks Instrument Division Emerson Electric Co., США, з компаратором – турбінним перетворювачем витрати Smith Meter серії MVTM, США, відносна розширена невизначеність вимірювання місткості ТПУ склала 0,03%. Основний внесок у розширену невизначеність вимірювання при калібруванні ТПУ склали стандартні невизначеності, обумовлені впливом об'ємного розширення рідини (вимірювання температури рідини) в ТПУ та компакт-прувері, стандартна невизначеність еталонного компакт-прувера та експериментальна стандартна невизначеність середнього результату вимірювання місткості ТПУ.

**Ключові слова:** трубопоршневі повірочні установки, еталони, невизначеність вимірювання, облік нафти.

В работе отмечено, что для определения количества нефти применяются узлы учета нефти. На узлах учета нефти, реализующих метод динамических измерений, количество нефти определяется по показаниям счетчиков нефти (турбинных или массовых расходомеров). Такие преобразователи расхода (расходомеры-счетчики) в процессе эксплуатации подлежат поверке. Основными эталонными средствами, применяемыми для поверки преобразователей расхода, являются трубопоршневые поверочные установки (ТПУ). Калибровка таких эталонных установок может производиться с применением эталонных мерников, эталонных весов и с помощью эталонной трубопоршневой установки (компакт-прувера) с компаратором. Разработаны методики калибровки ТПУ с применением эталонных мерников, а также эталонного компакт-прувера с компаратором, прошедшие апробацию при калибровке эталонных трубопоршневых установок, эксплуатируемых на объектах АО «Укртранснафта». Рассмотрен метод, а также приведена структурная схема калибровки ТПУ с помощью эталонного компакт-прувера с компаратором. Составлена математическая модель с учетом влияющих факторов и алгоритмов их оценки, а также определены метрологические характеристики ТПУ - сформирован

бюджет неопределенности и осуществлено оценивание неопределенности измерения емкости трубопоршневой поверочной установки при проведении ее калибровки с помощью эталонного компакт-прувера с компаратором. По результатам калибровки ТПУ ВНР -1100 фирмы "VEGYEPSZER", Венгрия, эксплуатируемой в Филее «ПДМН» АО «Укртранснафта» (г. Кременчук), с применением эталонного компакт-прувера Compact Prover фирмы Brooks Instrument Division Emerson Electric Co., США с компаратором - турбинным преобразователем расхода Smith Meter серии MVTM, США, относительная расширенная неопределенность измерения емкости ТПУ составила 0,03%. Основной вклад в расширенную неопределенность измерения при калибровке ТПУ составили стандартные неопределенности, обусловленные влиянием объемного расширения жидкости (измерение температуры жидкости) в ТПУ и эталонного компакт-прувера, стандартная неопределенность эталонного компакт-прувера и экспериментальная стандартная неопределенность среднего результата измерения емкости ТПУ.

**Ключевые слова:** трубопоршневые поверочные установки, эталоны, неопределенность измерений, учет нефти.

In this paper noted that oil metering units are used to determine the amount of crude oil. The metering units of crude oil that implement the method of dynamic measurements, the amount of oil is determined by the readings of oil meters (turbine or mass flow meters). Such flow rate transducers (flow meters) are subject to verification during operation. The main reference means used for the calibration of flow transducers are pipe provers (TPP). Calibration of such reference units can be performed using reference meters (compact-prover), reference balance and using a reference pipe prover with a comparator. The methods of calibration pipe provers with the use of reference meters (standard volume measure), as well as a reference compact-prover with a comparator have been developed. These methods of calibration approbation during the calibration of reference pipe prover installations operated at the facilities of JSC "Ukrtransnafta". The method is considered, and also the structural scheme of calibration of TPP by means of the reference compact prover with the comparator is resulted. A mathematical model is developed taking into account the influential factors and algorithms for their evaluation, as well as the metrological characteristics of TPP are determined - the uncertainty budget is formed and the uncertainty of measuring the capacity of the pipe prover calibration unit is estimated. According to the results of calibration of TPP ВНР -1100 company "VEGYEPSZER", Hungary, operated in the Branch "PDMN" JSC "Ukrtransnafta" (Kremenchuk) using the reference Compact Prover company Brooks Instrument Division Emerson Electric Co., USA comparator - turbine flow meter Smith Meter series MVTM, USA, the relative extended uncertainty of TPP capacity measurement was 0,03%. The main contributions to the extended measurement uncertainty during TPP calibration were the standard uncertainties due to the influence of liquid volume expansion (liquid temperature measurement) in TPP and compact-prover, the standard uncertainty of the reference compact-prover and the experimental standard uncertainty of pipe prover capacitance measurement result's mean value.

**Keywords:** pipe provers, standard measuring equipments, the uncertainty measurement, the amount of crude oil.

### Постановка проблеми

Зростання вартості енергоносіїв, зокрема нафти, разом з наростаючим дефіцитом в обсягах її видобутку і підготовки ведуть до підвищення вимог до точності, забезпечення єдності та достовірності вимірювань, удосконалення існуючих та розробки, впровадження нових методів та засобів обліку нафти.

Для визначення кількості нафти застосовуються вузли обліку нафти (ВОН). На ВОН, що реалізують метод динамічних вимірювань, кількість нафти визначається за показами лічильників нафти (турбінних або масових витратомірів). Відповідно до Закону України [1] та нормативно-правових актів [2, 3] такі перетворювачі витрати (витратоміри-

лічильники) у процесі експлуатації підлягають повірці.

При проведенні повірки перетворювачів витрати на ВОН, як еталонні засоби, в основному, застосовуються трубопоршневі повірочні установки (ТПУ). ТПУ дозволяють визначати метрологічні характеристики (МХ) даних засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) на місці експлуатації в процесі вимірювання в робочих умовах на реальному робочому середовищі.

Під час експлуатації ТПУ необхідно здійснювати визначення (контроль) їх метрологічних характеристик (МХ). До недавнього часу МХ ТПУ визначались (контролювались) шляхом проведення їх повірки. Методи та засоби повірки

трубопоршневих установок, похибки вимірювань при застосуванні різних засобів повірки ТПУ розглянуті в [4, 5, 6].

Повірка ТПУ здійснювалася відповідно до методик повірки [5, 6], які містили вимоги до процесу проведення повірки, визначення метрологічних характеристик ТПУ з застосуванням теорії похибок, зокрема визначення місткості ТПУ, середнього квадратичного відхилення випадкової складової похибки, границь сумарної систематичної похибки, відносної похибки. Проте, методики повірки не встановлювали процедуру формування бюджету та оцінювання невизначеностей вимірювань [7].

Відповідно до Закону України [1] еталони підлягають калібруванню. При цьому проведення калібрування ЗВТ є одним з чинників, що забезпечує довіру до результатів вимірювань та визначає метрологічну простежуваність.

Калібрування має безпосереднє відношення до метрологічного підтвердження, що визначається як сукупність операцій, необхідних для гарантування відповідності вимірювального обладнання вимогам до його використання за призначенням [8].

Тому на даний час досить актуальними є питання, які стосуються розроблення методик калібрування ЗВТ, зокрема еталонних трубопоршневих установок, складання математичної моделі вимірювань, алгоритмів оцінювання невизначеності вимірювань, визначення складових бюджету та їх внесок у невизначеність вимірювання.

**Мета роботи** – розробити методики калібрування еталонних трубопоршневих установок, скласти математичну модель визначення місткості ТПУ з врахуванням впливових факторів, навести алгоритми оцінювання невизначеності вимірювань, визначити складові бюджету та їх внесок у невизначеність вимірювання. За результатами калібрування ТПУ визначити метрологічні характеристики на основі теорії невизначеності.

#### **Основний текст статті.**

Калібрування трубопоршневих повірочних установок може проводитися із застосуванням еталонних мірників (як правило, на воді), еталонних ваг та за допомогою еталонної ТПУ (компакт-прувера) з компаратором [4, 9].

У ДП «Івано-Франківськ-стандартметрологія» розроблені методики калібрування ТПУ із застосуванням еталонних мірників та за допомогою еталонної ТПУ з компаратором. Вказані методики пройшли апробацію та застосовуються для калібрування еталонних трубопоршневих установок, які експлуатуються на об'єктах АТ «Укртранснафта». Основними операціями, які наведені у методиках калібрування, є опис процедури проведення калібрування, складання математичної моделі вимірювань, опрацювання результатів калібрування і оцінювання невизначеності вимірювань [7].

Процедуру калібрування еталонної трубопоршневої установки (компакт-прувера) із застосуванням еталонного мірника, складання математичної моделі вимірювань, алгоритмів оцінювання невизначеності вимірювань, визначення складових бюджету та їх внесок у невизначеність вимірювання розглянуто в [7].

Розглянемо основні операції при калібруванні трубопоршневої повірочної установки за допомогою еталонної ТПУ (компакт-прувера) з розширеною невизначеність вимірювань 0,014%.

Метод калібрування полягає у визначенні невідомої місткості каліброваної ділянки робочої ТПУ з відомою місткістю каліброваної ділянки еталонної ТПУ з застосуванням компаратора за робочих умов. У якості робочого середовища застосовується робоча рідина (нафта).

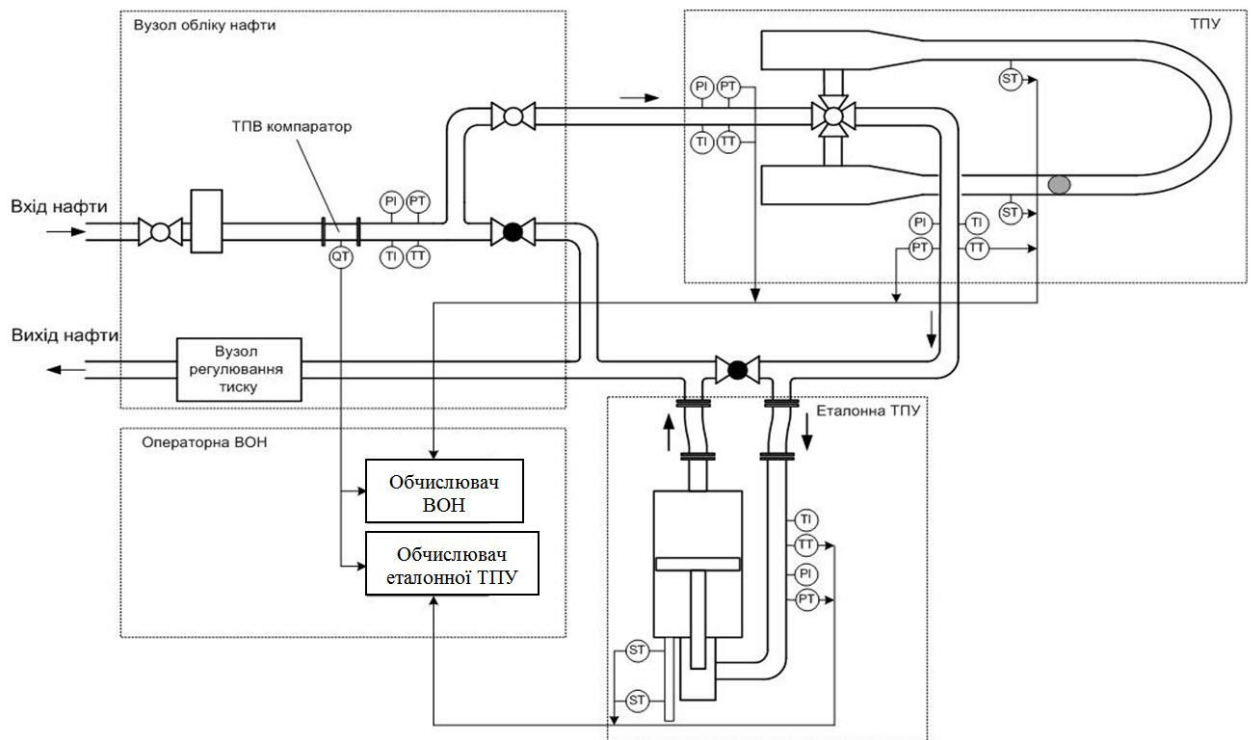
Структурна схема калібрування ТПУ за допомогою еталонної ТПУ (компакт-прувера) та компаратора наведена на рис. 1.

ТПУ, що калібрується, еталонний компакт-прувер та компаратор з'єднуються послідовно (рис.1). Робоча рідина (нафта) поступає на ВОН, пройшовши компаратор-турбінний перетворювач витрати надходить на ТПУ, що калібрується. Після ТПУ нафта поступає на еталонний компакт-прувер і через вузол регулювання тиску поступає на вихід з вузла обліку. Операції по визначенню місткості ТПУ проводяться при постійному значенні витрати робочої рідини.

Під час калібрування запускається поршень еталонного компакт-прувера і вимірюється кількість імпульсів, що видається компаратором за один прохід поршня по каліброваній ділянці

компакт-прувера. Аналогічно вимірюється кількість імпульсів, що видається компаратором за один прохід кульового поршня по каліброваній ділянці робочої ТПУ, що калібрується.

При розробленні методики калібрування, серед іншого, складається математична модель, зокрема алгоритм визначення місткості ТПУ, що калібрується.



*ВОН* - вузол обліку нафти; *ТПВ* – турбінний перетворювач витрати; *TI* – термометри; *TT* – перетворювачі температури; *PI* – манометри; *PT* – перетворювачі тиску; *QT* – перетворювач витрати; *ST* – оптичні перемикачі.

**Рисунок 1 – Структурна схема калібрування ТПУ за допомогою еталонної ТПУ (компакт-прувера) та компаратора**

ТПУ, що калібрується, еталонний компакт-прувер та компаратор з'єднуються послідовно (рис.1). Робоча рідина (нафта) поступає на ВОН, пройшовши компаратор-турбінний перетворювач витрати надходить на ТПУ, що калібрується. Після ТПУ нафта поступає на еталонний компакт-прувер і через вузол регулювання тиску поступає на вихід з вузла обліку. Операції по визначенню місткості ТПУ проводяться при постійному значенні витрати робочої рідини.

Під час калібрування запускається поршень еталонного компакт-прувера і вимірюється кількість імпульсів, що видається компаратором

за один прохід поршня по каліброваній ділянці компакт-прувера. Аналогічно вимірюється кількість імпульсів, що видається компаратором за один прохід кульового поршня по каліброваній ділянці робочої ТПУ, що калібрується.

При розробленні методики калібрування, серед іншого, складається математична модель, зокрема алгоритм визначення місткості ТПУ, що калібрується.

**Математична модель вимірювання** з врахуванням впливових факторів та алгоритмів їх оцінювання при калібруванні ТПУ за допомогою еталонної ТПУ з компаратором буде

наступною.

Значення місткості ТПУ, що калібрується, ( $V_p$ , м<sup>3</sup>) за нормальних умов відповідно до [6, 7, 9] можна визначати за наступним виразом:

$$V_p = V_{cp} \cdot \frac{N_m^p}{N_m^{cp}} \cdot \frac{K_{tscp} \cdot K_{tsInv} \cdot K_{psc} \cdot K_{tlcp} \cdot K_{plcp}}{K_{tsp} \cdot K_{psp} \cdot K_{tlp} \cdot K_{plp}}, \quad (1)$$

де  $V_{cp}$  - значення місткості еталонної ТПУ за нормальних умов (зі сертифікату/свідоцтва про калібрування еталонної ТПУ), м<sup>3</sup>;

$N_m^p$  - кількість імпульсів, які видаються компаратором за період проходження поршня калібною ділянкою ТПУ, що калібрується;

де  $N_m^{cp}$  - кількість імпульсів, які видаються компаратором за період проходження поршня калібною ділянкою еталонної ТПУ;

$K_{tscp}$  - коефіцієнт, що враховує вплив теплового розширення матеріалу еталонної ТПУ;

$K_{tsInv}$  - коефіцієнт, що враховує вплив теплового розширення інварового стержня;

$K_{psc}$  - коефіцієнт, що враховує вплив тиску на матеріал еталонної ТПУ;

$K_{tlcp}$  - коефіцієнт, що враховує вплив теплового розширення рідини в еталонній ТПУ;

$K_{plcp}$  - коефіцієнт, що враховує вплив тиску на рідину в еталонній ТПУ;

$K_{tsp}$  - коефіцієнт, що враховує вплив теплового розширення матеріалу ТПУ, що калібрується;

$K_{psp}$  - коефіцієнт, що враховує вплив тиску на матеріал ТПУ, що калібрується;

$K_{tlp}$  - коефіцієнт, що враховує вплив теплового розширення рідини в ТПУ, що калібрується;

$K_{plp}$  - коефіцієнт, що враховує вплив тиску на рідину в ТПУ, що калібрується.

Коефіцієнти, що враховують впливові фактори на місткість ТПУ при її калібруванні, з врахуванням [6, 7, 9] можна визначати за наступними алгоритмами:

$$K_{tscp} = 1 + 2\alpha_{t_{cp}}(t_{cp} - 20), \quad (2)$$

де  $\alpha_{t_{cp}}$  - коефіцієнт лінійного розширення матеріалу стінок еталонної ТПУ, °C<sup>-1</sup>.

$t_{cp}$  - середнє значення температури рідини в еталонній ТПУ за калібрувальний прохід, °C.

$$K_{tsInv} = 1 + \alpha_{t_{Inv}}(t_{pInv} - 20), \quad (3)$$

де  $\alpha_{t_{Inv}}$  - коефіцієнт лінійного розширення інварового стержня еталонної ТПУ, °C<sup>-1</sup>;

$t_{pInv}$  - середнє значення температури інварового стержня еталонної ТПУ під час калібрувального проходу, °C.

$$K_{psc} = 1 + \frac{0,95 D_{cp}}{E_{cp}} \cdot \frac{P_{cp}}{S_{cp}}, \quad (4)$$

де  $E_{cp}$  - модуль пружності матеріалу стінок еталонної ТПУ, МПа;

$D_{cp}$  - внутрішній діаметр калібною ділянкою еталонної ТПУ, мм;

$S_{cp}$  - товщина стінок еталонної ТПУ, мм;

$P_{cp}$  - середнє значення тиску в еталонній ТПУ за період калібрувального проходу, МПа.

$$K_{tlcp} = 1 + \beta \cdot (t_{lcp} - 20) \quad (5)$$

де  $\beta$  - коефіцієнт об'ємного розширення рідини, °C<sup>-1</sup>.

$$K_{plcp} = 1 + F \cdot P_{cp} \quad (6)$$

де  $F$  - коефіцієнт стисливості рідини, МПа<sup>-1</sup>.

$$K_{tsp} = 1 + 3\alpha_{t_p}(t_p - 20), \quad (7)$$

де  $\alpha_{t_p}$  - коефіцієнт лінійного розширення матеріалу стінок ТПУ, що калібрується, °C<sup>-1</sup>.

$t_p$  - середнє значення температури рідини в ТПУ, що калібрується, за калібрувальний прохід, °C.

$$K_{psp} = 1 + \frac{0,95 D_p}{E_p} \cdot \frac{P_p}{S_p}, \quad (8)$$

де  $E$  - модуль пружності матеріалу стінок ТПУ, що калібрується, МПа;

$D$  - внутрішній діаметр калібною ділянкою ТПУ, що калібрується, мм;

$S$  - товщина стінок ТПУ, що калібрується, мм;

$P_p$  - середнє значення тиску в ТПУ, що калібрується, за період калібрувального проходу, МПа.

$$K_{t_{lp}} = 1 + \beta \cdot (t_{lp} - 20) \quad (9)$$

$$K_{p_{lp}} = 1 + F \cdot P_p \quad (10)$$

$$u(V) = \sqrt{u(V_p)^2 + [c(V_{CP}) \cdot u(V_{CP})]^2 + [c(N_m^P) \cdot u(N_m^P)]^2 + [c(N_m^{CP}) \cdot u(N_m^{CP})]^2 + [c(t_p) \cdot u(t_p)]^2 + [c(t_{CP}) \cdot u(t_{CP})]^2 + [c(t_{Inv}) \cdot u(t_{Inv})]^2 + [c(P_p) \cdot u(P_p)]^2 + [c(P_{CP}) \cdot u(P_{CP})]^2 + [c(K_{tscp}) \cdot u(K_{tscp})]^2 + [c(K_{tInv}) \cdot u(K_{tInv})]^2 + [c(K_{tsp}) \cdot u(K_{tsp})]^2 + [c(t_{lp}) \cdot u(t_{lp})]^2 + [c(t_{ICP}) \cdot u(t_{ICP})]^2 + [c(E_p) \cdot u(E_p)]^2 + [c(E_{CP}) \cdot u(E_{CP})]^2 + [c(D_p) \cdot u(D_p)]^2 + [c(D_{CP}) \cdot u(D_{CP})]^2 + [c(S_p) \cdot u(S_p)]^2 + [c(S_{CP}) \cdot u(S_{CP})]^2 + [c(SR_p) \cdot u(SR_p)]^2} \quad (11)$$

де  $u(V_p)$  – стандартна невизначеність середнього результату вимірювання місткості ТПУ, що калібрується, за нормальних умов,  $m^3$ , відповідно;

$c(V_{CP})$ ,  $u(V_{CP})$  – коефіцієнт чутливості та стандартна невизначеність еталонної ТПУ, що калібрується,  $m^3$ , відповідно;

$c(N_m^P)$ ,  $u(N_m^P)$  – коефіцієнт чутливості та стандартна невизначеність, обумовлена вимірюванням кількості імпульсів, які видаються компаратором за період проходження поршня каліброваною ділянкою ТПУ, що калібрується,  $m^3/imp.$ ;  $imp.$ , відповідно;

$c(N_m^{CP})$ ,  $u(N_m^{CP})$  – коефіцієнт чутливості та стандартна невизначеність, обумовлена вимірюванням кількості імпульсів, які видаються компаратором за період проходження поршня каліброваною ділянкою еталонної ТПУ,  $m^3/imp.$ ;  $imp.$ , відповідно;

$c(t_p)$ ,  $u(t_p)$  – коефіцієнт чутливості та стандартна невизначеність, обумовлена впливом вимірювання температури в ТПУ, що калібрується,  $m^3/^\circ C$ ;  $^\circ C$ , відповідно;

$c(t_{CP})$ ,  $u(t_{CP})$  – коефіцієнт чутливості та стандартна невизначеність, обумовлена впливом вимірювання температури в еталонній ТПУ,  $m^3/^\circ C$ ;  $^\circ C$ , відповідно;

$c(t_{Inv})$ ,  $u(t_{Inv})$  – коефіцієнт чутливості та стандартна невизначеність, обумовлена впливом

Під час опрацювання результатів калібрування ТПУ за допомогою еталонної ТПУ з компаратором здійснюється оцінювання невизначеності вимірювання місткості ТПУ за наступним алгоритмом.

**Сумарна стандартна невизначеність** вимірювання місткості ТПУ, що калібрується, за нормальних умов розраховується за формулою:

вимірювання температури інварового стержня в еталонній ТПУ,  $m^3/^\circ C$ ;  $^\circ C$ , відповідно;

$c(P_p)$ ,  $u(P_p)$  – коефіцієнт чутливості та стандартна невизначеність, обумовлена впливом вимірювання тиску в ТПУ, що калібрується,  $m^3/MPa$ ;  $MPa$ , відповідно;

$c(P_{CP})$ ,  $u(P_{CP})$  – коефіцієнт чутливості та стандартна невизначеність, обумовлена впливом вимірювання тиску в еталонній ТПУ,  $m^3/MPa$ ;  $MPa$ , відповідно;

$c(K_{tscp})$ ,  $u(K_{tscp})$  – коефіцієнт чутливості та стандартна невизначеність, обумовлена впливом коефіцієнта теплового розширення матеріалу еталонної ТПУ,  $m^3/^\circ C$ ;  $^\circ C^{-1}$ , відповідно;

$c(K_{tInv})$ ,  $u(K_{tInv})$  – коефіцієнт чутливості та стандартна невизначеність, обумовлена впливом коефіцієнта теплового розширення інварового стержня еталонної ТПУ,  $m^3/^\circ C$ ;  $^\circ C^{-1}$ , відповідно;

$c(K_{tsp})$ ,  $u(K_{tsp})$  – коефіцієнт чутливості та стандартна невизначеність, обумовлена впливом коефіцієнта теплового розширення матеріалу ТПУ, що калібрується,  $m^3/^\circ C$ ;  $^\circ C^{-1}$ , відповідно;

$c(t_{lp})$ ,  $u(t_{lp})$  – коефіцієнт чутливості та стандартна невизначеність, обумовлена впливом об'ємного розширення рідини (вимірювання температури рідини) в ТПУ, що калібрується,  $m^3/^\circ C$ ;  $^\circ C$ , відповідно;

$c(t_{ICP}), u(t_{ICP})$  – коефіцієнт чутливості та стандартна невизначеність, обумовлена впливом об'ємного розширення рідини (вимірювання температури рідини) в еталонній ТПУ,  $\text{м}^3/^\circ\text{C}$ ;  $^\circ\text{C}$ , відповідно;

$c(E_P), u(E_P)$  – коефіцієнт чутливості та стандартна невизначеність, обумовлена впливом модуля пружності матеріалу ТПУ, що калібрується,  $\text{м}^3/\text{МПа}$ ; МПа, відповідно;

$c(E_{CP}), u(E_{CP})$  – коефіцієнт чутливості та стандартна невизначеність, обумовлена впливом модуля пружності матеріалу еталонної ТПУ,  $\text{м}^3/\text{МПа}$ ; МПа, відповідно;

$c(D_P), u(D_P)$  – коефіцієнт чутливості та стандартна невизначеність, обумовлена впливом вимірювання внутрішнього діаметру ТПУ, що калібрується,  $\text{м}^3/\text{мм}$ ; мм, відповідно;

$c(D_{CP}), u(D_{CP})$  – коефіцієнт чутливості та стандартна невизначеність, обумовлена впливом вимірювання внутрішнього діаметру еталонної ТПУ, що калібрується, що калібрується,  $\text{дм}^3/\text{мм}$ ; мм, відповідно;

$c(S_P), u(S_P)$  – коефіцієнт чутливості та стандартна невизначеність, обумовлена впливом вимірювання товщини стінки ТПУ, що калібрується,  $\text{м}^3/\text{мм}$ ; мм, відповідно;

$c(S_{CP}), u(S_{CP})$  – коефіцієнт чутливості та стандартна невизначеність, обумовлена впливом

вимірювання товщини стінки еталонної ТПУ,  $\text{м}^3/\text{мм}$ ; мм, відповідно;

$c(SR_P), u(SR_P)$  – коефіцієнт чутливості та стандартна невизначеність, обумовлена впливом оптичного перемикача ТПУ, що калібрується,  $\text{м}^3$ , відповідно.

Стандартна невизначеність середнього результату вимірювання місткості ТПУ, що калібрується, за нормальних умов (за типом А), а також стандартні невизначеності інших складових бюджету невизначеностей (за типом В) з врахуванням [7, 9, 10, 11] визначаються за виразами, наведеними в таблиці 1. Окрім того, в таблиці 1 наведено оцінку вхідних величин та їх внесок у сумарну невизначеність вимірювань для ТПУ, що калібрується.

Розширена невизначеність вимірювання в кожній калібрувальній точці визначається за формулою:

$$U(V) = k \cdot u(V) \quad (12)$$

де  $u(V)$  – сумарна невизначеність вимірювань в кожній калібрувальній точці;

$k$  – коефіцієнт охоплення,  $k=2$  з рівнем довіри 95% при нормальному розподілі.

На основі результатів, отриманих при калібруванні ТПУ за допомогою еталонної ТПУ з компаратором, сформовано бюджет невизначеності (табл.1).

Таблиця 1 - Бюджет невизначеності

Вхідна величина/ складові невизначеності	Оцінка вхідної величини	Стандартна невизначеність	Коефіцієнт чутливості	Закон розподілу	Внесок невизначеності, $(c \cdot u_i)^2$ , $\text{м}^3$
					Ваговий внесок у невизначеність
$u(V_P)$	11,92027 $\text{м}^3$	$u(V_P) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{pi} - \bar{V}_P)^2}{n(n-1)}} = 0,00069 \text{ м}^3$	-	Нормальний	4,73934 · 10 <sup>-7</sup> 14,74575%
$u(V_{CP})$	0,24745 $\text{м}^3$	$u(V_{CP}) = 1,750 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$	$c(V_{CP}) = \frac{\partial V_P}{\partial V_{CP}} = 47,86977$	Нормальний	7,01776 · 10 <sup>-7</sup> 21,83470%

$u(N_m^P)$	3243,731 імп.	$u(N_m^P) = \frac{U(N_m^P)}{\sqrt{3}} = 0,00058$ імп.	$c(N_m^P) = \frac{\partial V_P}{\partial N_m^P} =$ $= 0,00367$ $\text{м}^3/\text{імп.}$	Рівно- мірний	$4,54286 \cdot 10^{-12}$
					0,00014%
$u(N_m^{CP})$	67,765 імп.	$u(N_m^{CP}) = \frac{U(N_m^{CP})}{\sqrt{3}} = 0,00058$ імп.	$c(N_m^{CP}) = \frac{\partial V_P}{\partial N_m^{CP}} =$ $= -0,17590$ $\text{м}^3/\text{імп.}$	Рівно- мірний	$1,04090 \cdot 10^{-8}$
					0,32386%
$u(t_p)$	12,38 °C	$u(t_p) = \frac{U(t)}{\sqrt{3}} = 0,1^\circ \text{C}$	$c(t_p) = \frac{\partial V_P}{\partial t_p} =$ $= -4,0062 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/^\circ \text{C}$	Рівно- мірний	$1,60496 \cdot 10^{-9}$
					0,04994%
$u(t_{CP})$	12,37 °C	$u(t_{CP}) = \frac{U(t)}{\sqrt{3}} = 0,1^\circ \text{C}$	$c(t_{inv}) = \frac{\partial V_P}{\partial t_{CP}} =$ $= 2,57518 \cdot 10^{-4}$ $\text{м}^3/^\circ \text{C}$	Рівно- мірний	$6,63153 \cdot 10^{-10}$
					0,02063%
$u(t_{Inv})$	14,00 °C	$u(t_{Inv}) = \frac{U(t)}{\sqrt{3}} = 0,1^\circ \text{C}$	$c(t_{Inv}) = \frac{\partial V_P}{\partial t_{Inv}} =$ $= 1,28739 \cdot 10^{-4}$ $\text{м}^3/^\circ \text{C}$	Рівно- мірний	$1,65737 \cdot 10^{-10}$
					0,00516%
$u(P_p)$	0,25 МПа	$u(P_p) = \frac{U(P)}{\sqrt{3}} = 0,00087$ МПа	$c(P_p) = \frac{\partial V_P}{\partial P_p} =$ $= -2,15688 \cdot 10^{-3}$ $\text{м}^3/\text{МПа}$	Рівно- мірний	$3,52120 \cdot 10^{-12}$
					0,00011%
$u(P_{CP})$	0,238 МПа	$u(P_p) = \frac{U(P)}{\sqrt{3}} = 0,00087$ МПа	$c(P_{CP}) = \frac{\partial V_P}{\partial P_{CP}} =$ $= 1,38242 \cdot 10^{-3}$ $\text{м}^3/\text{МПа}$	Рівно- мірний	$1,44651 \cdot 10^{-12}$
					0,00004%
$u(K_{tscp})$	0,99984	$u(K_{tscs}) = \frac{U(K_{tscp})}{\sqrt{3}} = 6,242 \cdot 10^{-7}$ °C <sup>-1</sup>	$c(K_{tsp}) = \frac{\partial V_P}{\partial \alpha_{tp}} =$ $= -181,93143$ $\text{м}^3/^\circ \text{C}^{-1}$	Рівно- мірний	$1,28994 \cdot 10^{-8}$
					0,40135%



$u(K_{tsInv})$	0,99999	$u(K_{tsInv}) = \frac{U(K_{tsInv})}{\sqrt{3}} = 8,092 \cdot 10^{-8} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$c(K_{tsInv}) = \frac{\partial V_P}{\partial \alpha_{Inv}} = -71,52150 \text{ } \text{M}^3/\text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	Рівно- мірний	$3,34994 \cdot 10^{-11}$ 0,00104%
$u(K_{tsp})$	0,99974	$u(K_{tsp}) = \frac{U(K_{tsp})}{\sqrt{3}} = 6,474 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$c(K_{tsp}) = \frac{\partial V_P}{\partial \alpha_{tp}} = 272,56439 \text{ } \text{M}^3/\text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	Рівно- мірний	$3,11374 \cdot 10^{-8}$ 0,96879%
$u(t_{tp})$	12,38 $^\circ\text{C}$	$u(t_{tp}) = \frac{U(t)}{\sqrt{3}} = 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$	$c(t_{tp}) = \frac{\partial V_P}{\partial t_{tp}} = -9,8843 \cdot 10^{-3} \text{ } \text{M}^3/\text{ } ^\circ\text{C}$	Рівно- мірний	$9,76994 \cdot 10^{-7}$ 30,39768%
$u(t_{ICP})$	12,37 $^\circ\text{C}$	$u(t_{ICP}) = \frac{U(t)}{\sqrt{3}} = 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$	$c(t_{ICP}) = \frac{\partial V_P}{\partial t_{ICP}} = 9,88436 \cdot 10^{-3} \text{ } \text{M}^3/\text{ } ^\circ\text{C}$	Рівно- мірний	$9,77006 \cdot 10^{-7}$ 30,39805%
$u(E_P)$	$2,10 \cdot 10^5$ МПа	$u(E_P) = \frac{U(E_P)}{\sqrt{3}} = 1,2139 \cdot 10^4$ МПа	$c(E_P) = \frac{\partial V_P}{\partial E_P} = 2,56772 \cdot 10^{-9} \text{ } \text{M}^3/\text{МПа}$	Рівно- мірний	$9,71494 \cdot 10^{-10}$ 0,03023%
$u(E_{CP})$	$1,965 \cdot 10^5$ МПа	$u(E_{CP}) = \frac{U(E_{CP})}{\sqrt{3}} = 1,1358 \cdot 10^4$ МПа	$c(E_{CP}) = \frac{\partial V_P}{\partial E_{CP}} = -1,67438 \cdot 10^{-9} \text{ } \text{M}^3/\text{МПа}$	Рівно- мірний	$3,61696 \cdot 10^{-10}$ 0,01113%
$u(D_P)$	400,0 мм	$u(D_P) = \frac{U(D)}{\sqrt{3}} = 0,577$ мм	$c(D_P) = \frac{\partial V_P}{\partial D_P} = -1,34805 \cdot 10^{-6} \text{ } \text{M}^3/\text{мм}$	Рівно- мірний	$6,05012 \cdot 10^{-13}$ $1,882 \cdot 10^{-5} \%$
$u(D_{CP})$	647,7 мм	$u(D_{CP}) = \frac{U(D)}{\sqrt{3}} = 0,577$ мм	$c(D_{CP}) = \frac{\partial V_{CP}}{\partial D_{CP}} = 5,07977 \cdot 10^{-7} \text{ } \text{M}^3/\text{мм}$	Рівно- мірний	$8,59091 \cdot 10^{-14}$ $2,673 \cdot 10^{-6} \%$
$u(S_P)$	10 мм	$u(S_P) = \frac{U(S)}{\sqrt{3}} = 0,577$ мм	$c(S_P) = \frac{\partial V_P}{\partial S_P} = 5,3922 \cdot 10^{-5} \text{ } \text{M}^3/\text{мм}$	Рівно- мірний	$9,6802 \cdot 10^{-10}$ 0,030112%
$u(S_{CP})$	27 мм	$u(S_{CP}) = \frac{U(S)}{\sqrt{3}} = 0,577$	$c(S_{CP}) = \frac{\partial V_{CP}}{\partial S_{CP}} = -1,21858 \cdot 10^{-5}$	Рівно- мірний	$4,94379 \cdot 10^{-11}$

		мм	м <sup>3</sup> /мм		0,00154%
$u(SR_p)$	0,0023%	$u(SR) = \frac{U(SR)}{\sqrt{3}} =$ $= 1,583 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$	$c(SR) = \frac{\partial V_p}{\partial V_{SR}} = 1$	Рівно- мірний	$2,50566 \cdot 10^{-8}$  0,77960%
<b>Вихідна величина</b>	<b>Оцінка вихідної величини</b>	<b>Сумарна стандартна невизначеність</b>	<b>Рівень довіри</b>	<b>Коефіцієнт охоплення</b>	<b>Розширена невизначеність</b>
$V$	11,92013 м <sup>3</sup>	$u(V) = 0,00179 \text{ м}^3$	0,95	$K=2$	$U(V) =$ $= 0,00358 \text{ м}^3$ $U(V) =$ $= 0,03 \%$

Таким чином, за результатами калібрування трубопоршневої повірочної установки ВНР -1100 фірми "VEGYEPSZER", Угорщина, що експлуатується у Філії «ПДМН» ЛВДС «Кременчук» АТ «Укртранснафта» (м. Кременчук) із застосуванням еталонного компакт-прувера Compact Prover фірми Brooks Instrument Division Emerson Electric Co., США, з компаратором – турбінним перетворювачем витрати Smith Meter серії MVTM, США, відносна розширена невизначеність вимірювання місткості ТПУ склала 0,03%. Основний внесок у розширену невизначеність вимірювання при калібруванні ТПУ склали стандартні невизначеності, обумовлені впливом об’ємного розширення рідини (вимірювання температури рідини) в ТПУ та компакт-прувері, стандартна невизначеність еталонного компакт-прувера та експериментальна стандартна невизначеність середнього результату вимірювання місткості ТПУ.

### ВИСНОВКИ

Наведено методи та засоби калібрування ТПУ, що застосовуються для повірки перетворювачів витрати при обліку нафти; складено математичну модель з врахуванням впливових факторів та алгоритмів їх оцінювання, сформовано

бюджет невизначеності, а також наведено алгоритм оцінювання невизначеності вимірювання місткості ТПУ.

Розроблена методика калібрування ТПУ із застосуванням еталонної ТПУ з компаратором, що пройшла апробацію та застосовується при калібруванні ТПУ, які експлуатуються на об’єктах ПАТ «Укртранснафта».

За результатами калібрування ТПУ із застосуванням еталонної ТПУ з компаратором визначено метрологічні характеристики ТПУ на основі концепції невизначеності, а також складові бюджету та їх внесок у невизначеність вимірювання.

### Література

1. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність». Відомості Верховної Ради (ВВР), 2014, № 30, ст.1008.
2. Постанова Кабінету Міністрів України від 4 червня 2015 р. № 374 «Про затвердження переліку категорій законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що підлягають періодичній повірці».
3. Наказ Мінекономрозвитку від 21.12.2015 № 1719 «Про затвердження Норм часу, необхідного для проведення повірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації».

4. Измерение количества и качества нефти и нефтепродуктов при сборе, транспортировке и коммерческом учете/ Ханов Н.И., Фатхутдинов А.Ш., Слепян М.А., Золотухин Е.А., Фатхутдинов Т.А., Коловертнов Г.Ю.- СПб.: Изд-во СПбУЭФ. 2000. 268 с.

5. Р 081/24.99-99 Рекомендация. Метрология. Установки трубопоршневые. Типовая методика поверки установками на базе весов ОГВ или мерников. Введ. 01.01.2000. – Киев, 1999.- 47 с.

6. МИ 2974-2006 Рекомендация. ГСИ. Установки поверочные трубопоршневые 2-го разряда. Методика поверки трубопоршневой поверочной установкой 1-го разряда с компаратором. Введ. 01.05.2006. Уфа, 2006.- 52 с.

7. Петришин І.С., Кепещук Т.В. Оцінювання невизначеності вимірювання еталонних трубопоршневих установок під час обліку нафти// Метрологія та прилади. -2020.- №6.-С. 9-14.

8. Малецкая О.Е. Методики калибровки: опыт разработки и проблемы//Метрологія та прилади. 2012. С.35-38.

9. Paul Martin, IMASS. Realistic Pipe Prover Volume Uncertainty//27th International North Sea Flow Measurement Workshop 20 – 23 October 2009, Tønsberg, Norway.

10. EA-4/02 M:2013 Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration. - Date of Implementation. 18.10.2013. EA Laboratory Committee, 2013- 75 p.

11. Захаров И.П. Оценивание неопределенности измерений при проведении калибровок//Метрологія та прилади. 2007.№1. С. 31-42

### References

1. Закон Украйны «Pro metrolohiyu ta metrolohichnu diyal'nist'». Vidomosti Verkhovnoyi Rady (VVR), 2014, № 30, st.1008. (Law of Ukraine «On Metrology and Metrological Activity». Information of the Verkhovna Rada, 2014, № 30, p.1008)

2. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrayiny vid 4 chervnya 2015 r. № 374 «Pro zatverdzhennya pereliku katehoriy zakonodavcho rehol'ovanykh zasobiv vymiryuval'noyi tekhniki, shcho

pidlyahayut' periodychniy povirtsi». (Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated June 4, 2015 № 374 «About the statement of the list of categories of legally regulated means of measuring equipment which are subject to periodic verification».)

3. Nakaz Minekonomrozvytku vid 21.12.2015 № 1719 «Pro zatverdzhennya Norm chasu, neobkhidnoho dlya provedennya povirky zakonodavcho rehol'ovanykh zasobiv vymiryuval'noyi tekhniki, shcho perebuva'yut' v ekspluatatsiyi». (Order of the Ministry of Economic Development dated 21.12.2015 № 1719 «On approval of the norms of time required for verification of legally regulated measuring equipment in operation»)

4. Izmereniye kolichestva i kachestva nefi i nefteproduktov pri sbore, transportirovke i kommercheskom uchete / Khanov N.I., Fatkhutdinov A.SH., Slepian M.A., Zolotukhin Ye.A., Fatkhutdinov T.A., Kolovertnov G.YU - SPb.: Izd-vo SPbUEF. 2000.- 268 s. (Measurement of the quantity and quality of oil and oil products in the collection, transportation and commercial account/ Khanov N.I., Fatkhutdinov A.S., Slepian M.A., Zolotukhin E.A., Fatkhutdinov T.A., Kolovertnov G.Y. - St. Petersburg: Publishing SPUEF. 2000.- 268 p).

5. Р 081/24.99-99 Rekomendatsiya. Metrologiya. Ustanovki truboporshnevyye. Tipovaya metodika poverki ustanovkami na baze vesov OGV ili mernikov. Vved. 01.01.2000. – Kiyev, 1999.- 47 с. (R 081/24.99-99. Recommendation. Metrology. Pipe provers. Typical verification method with installations based on scales OGV or proving tank volume. Introduced. 01.01.2000. Kiev, 1999.- 47 p.).

6. MI 2974-2006. Rekomendatsiya. GSI. Ustanovki poverochnyye truboporshnevyye 2-go razryada. Metodika poverki truboporshnevoy poverochnoy ustanovkoy 1-go razryada s komparatorom. Vved. 01.05.2006. – Ufa, 2006.- 52 с. (MI 2974-2006 Recommendation. Metrology. Pipe provers. Verification method pipe provers using compact prover with master meter. Introduced. 01.05.2006. – Ufa, 2006.- 52 p.)

7. Petryshyn I.S., Kepeshchuk T.V. Otsinyuvannya nevyznachenosti vymiryuvannya etalonnnykh truboporshnevnykh ustanovok pid chas obliku nafty // Metrolohiya ta prylyady. -2020.-№6.-

S. 9-14. (Petryshyn I.S., Kepeshchuk T.V Prover in Account of Crude Oil. //Metrology and instruments. 2020.№6.P. 9-14).

8. Maletskaya O.Ye. Metodiki kalibrovki: opyt razrabotki i problemy // Metrolohiya ta prylady. 2012. P. 35-38. (Maletskaya O.E. Methods Calibration: development experience and problems// Metrology and instruments. -2012. – P. 35-38).

9. Paul Martin, IMASS. Realistic Pipe Prover Volume Uncertainty//27th International North Sea Flow Measurement Workshop 20 – 23 October 2009, Tønsberg, Norway.

Evaluation of the Uncertainty of Measurement Pipe  
10. EA-4/02 M:2013 Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration. - Date of Implementation. 18.10.2013. EA Laboratory Committee, 2013- 75 p.

11. Zakharov I.P. Otsenivaniye neopredelennosti izmereniy pri provedenii kalibrovok // Metrolohiya ta prylady. -2007.-№1.- S. 31-42 (Zakharov I.P. Evaluation of the uncertainty of measurement in calibration// Metrology and instruments. 2007. №1. P. 31-42).