

МЕТОДИ ТА ПРИЛАДИ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

УДК 621.317.39

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕСТОВИХ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ДІЕЛЬКОМЕТРИЧНИХ ВОЛОГОМІРІВ

К.Ю. Голуб^{1,2}, О.В. Заболотний¹*

¹ Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», вул. Чкалова, 17, м. Харків, 61070, e-mail: zzz77714@meta.ua

² НВП ХАРТРОН-АРКОС ЛТД, вул. Ак. Проскури, 1, а/с 9971, м. Харків, 61070, Україна, e-mail: golub-ekaterina@bk.ru

Проведений порівняльний аналіз тестових методів підвищення точності діелькометричних вологомірів і вибір найбільш ефективного способу, що дозволяє компенсувати основну складову невизначеності даних вологомірів – «сортову невизначеність». Основними вимогами при виборі способу є: забезпечення інваріантності вимірювань до зміни сорту речовини і можливість його застосування як в лабораторних, так і у виробничих умовах, як при вимірюваннях з обмеженим об'ємом матеріалу, так і в потоці. З цією метою проведено пошук способів визначення вологості речовин із застосуванням тестових методів. В якості інформаційної бази використані патенти по даному науковому напрямку. Детально розглянуто кожен з обраних способів, отримані розрахункові значення вологості за наведеними в патентах виразами із застосуванням повної формули Вінера, що найбільш точно описує залежність вологості речовини від її діелектричної проникності. В результаті аналізу отриманих значень і способу в цілому зроблені висновки щодо можливості компенсації «сортової невизначеності», наявності збіжності результатів з дійсними значеннями вологи і труднощів реалізації даного способу.

Ключові слова: нафта, вимірювання вологості, діелькометричний вологомір, «сортова невизначеність», формула Вінера, компенсація сортової залежності.

Приведен сравнительный анализ тестовых методов повышения точности диэлькометрических влагомеров и выбор наиболее эффективного способа, позволяющего компенсировать основную составляющую неопределённости данных влагомеров – «сортовую неопределённость». Основными требованиями при выборе способа являются: обеспечение инвариантности измерений к изменению сорта вещества и возможность его применения как в лабораторных, так и в производственных условиях, как при измерениях с ограниченным объёмом материала, так и в потоке. С этой целью проведён поиск способов определения влажности веществ с применением тестовых методов. В качестве информационной базы использованы патенты по данному научному направлению. Детально рассмотрен каждый из выбранных способов, получены расчётные значения влажности по приведенным в патентах выражениям с применением полной формулы Винера, наиболее точно описывающей зависимость влажности вещества от его диэлектрической проницаемости. В результате анализа полученных значений и способа в целом сделаны заключения о возможности компенсации «сортовой неопределённости», наличии сходимости результатов с действительными значениями влажности и трудности реализации данного способа.

Ключевые слова: нефть, измерение влажности, диэлькометрический влагомер, «сортовая неопределённость», формула Винера, компенсация сортовой зависимости.

In article the comparative analysis of test methods of accuracy increase for capacitive moisture meters and a choice of the most effective method allowing to compensate the main uncertainty component of these moisture meters – «uncertainty of substance type» are carried out. The main requirements at a choice of the method are: ensuring the invariancy of measurements to change of substance type and possibility of its

application as in laboratory and under production conditions as at measurements with a limited amount of substance and in a flow. For this purpose the search of methods for substances moisture determination with application of test methods is carried out. As the information base patents in this scientific field are used. Each of the chosen methods is in details considered. Calculated values of moisture are received according to expressions given in patents with application of the full Winer's formula which is the most precisely describing dependence of substance moisture from its dielectric permeability. As a result of the analysis of received values and a method in general the conclusions about possibility of «uncertainty of substance type» compensation, existence of convergence of results with the real moisture values and difficulty of realization of this method are made.

Keywords: petroleum, moisture measurement, capacitive moisture meter, «uncertainty of substance type», Winer's formula, compensation of substance type dependence.

Вступ. Показники якості нафти визначаються її властивостями. До основних властивостей нафти можна віднести її густину, фракційний склад, вміст сірки, парафінів, води і солей [1]. При цьому від густини, фракційного складу, вмісту сірки і парафінів переважно залежить якість одержуваних нафтопродуктів (наприклад, дизельного палива), а від вмісту води і солей – термін експлуатації нафтоперегінних установок.

Пластова вода є невід'ємною складовою всієї нафти, що видобувається. Диспергуючись у нафті, вона утворює емульсії типу «вода в нафті», де нафта виступає в якості дисперсійної фази, а вода – дисперсної. Вміст такої води може складати від 1% до 90% по масі і залежить від родовища нафти. Пластова вода в значній мірі мінералізована хлоридами натрію, магнію і кальцію (до 2500 мг/л солей навіть при наявності в нафті всього 1% води), а також сульфатами і гідрокарбонатами та містить механічні домішки. При нагріванні нафти вода розчиняє хлористі солі, і це призводить до утворення хлористого водню, який викликає корозію обладнання. Іншими прикладами негативного впливу води є порушення технологічного режиму роботи нафтопереробного устаткування, підвищення тиску в апаратурі установок переганання нафти, зниження їх продуктивності, мікрровибухи, а також витрати додаткової кількості тепла на підігрів нафти [2].

З цього випливає, що вміст води в нафті повинен бути мінімальним. Стандарт [3] встановлює наступні значення: не більше 0,5% для першої та другої груп і 1,0% для третьої групи нафти (група визначається фракційним складом нафти).

Найбільше поширення для контролю обводненості нафти і нафтопродуктів отримали діелектричні вологоміри. Так, відповідно до проведеного авторами аналізу ринку вологомірів (станом на вересень 2014 р.), встановлено, що діелектричні вологоміри

займають 39% усіх моделей, що виробляються, 36% займають надвисокочастотні вологоміри, виробництво інфрачервоних аналізаторів спектру та кондуктометричних вологомірів в сумі становить 25%. Вибір на користь діелектричних вологомірів пов'язаний, в першу чергу, з простотою їх експлуатації, можливістю розміщення датчика в трубопроводі, хорошими метрологічними характеристиками. Основним недоліком застосування таких вологомірів є наявність так званої «сортової невизначеності» [4]. Суть проблеми «сортової невизначеності» полягає в наступному. Відомо, що робота діелектричних вологомірів полягає у вимірюванні ємності первинного перетворювача, заповненого, наприклад, досліджуваною нафтою, і визначенні вологості за результатами вимірювання [5]. При цьому ємність первинного перетворювача є функцією від діелектричної проникності нафти, яка, в свою чергу, залежить від типу (сорту) нафти. Очевидно, що кількість сортів і марок нафти надзвичайно велика і не завжди існує можливість їх ідентифікувати або це пов'язано з часовими, грошовими та іншими витратами.

На думку авторів статті, одним з найбільш перспективних способів компенсації «сортової невизначеності» є застосування тестового підходу. На даний час теорія тестових методів знайшла широке застосування при вирішенні задач з підвищення точності вимірювань [6, 7]. У свою чергу, автори даної роботи пропонують використовувати такі методи для забезпечення інваріантності діелектричних вологомірів до зміни сорту речовини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вибору тестових методів в якості ефективного способу компенсації «сортової невизначеності» передував глибокий і детальний аналіз існуючих на сьогоднішній день способів вирішення заявленої проблеми. В якості інформаційної бази авторами використані патенти і авторські свідоцтва США, Канади, Японії, Китаю, країн

Європи, зокрема України та Росії. В ході дослідження виявлено ряд способів визначення вологості нафти діелькометричними вологомірами. Насамперед, це:

1) вимірювання діелектричної проникності при емульгації досліджуваної суміші нафти [8], при зміні кількісного складу або агрегатного стану одного з компонентів цієї суміші [9];

2) визначення вологості нафти за зміною температури, шляхом вимірювання діелектричної проникності при різних температурах або в результаті температурного впливу [10];

3) визначення вологості нафти в залежності від частоти [11];

4) визначення вологості з використанням градувальних характеристик або калібрувальних кривих [12];

5) вплив на досліджувану нафту електричним полем [13];

6) визначення вологості з використанням ємнісних датчиків різної конструкції [14];

7) визначення вологості шляхом вилучення вологи з нафти з подальшим вимірюванням [14];

8) вимірювання ємності первинного перетворювача з досліджуваною нафтою у початковому і зневодненому стані [15] або з досліджуваною та зразковою пробами нафти [16];

9) способи з вимірюванням декількох параметрів, таких як діелектрична проникність, тангенс кута діелектричних втрат, щільність, сорт, температура, швидкість проходження ультразвуку тощо [17];

10) вимірювання ємності первинного перетворювача в порожньому і заповненому стані [18];

11) визначення вологості нафти за коефіцієнтом амплітудної модуляції, струмом [19];

12) визначення вологості нафти за кутом зсуву фаз сигналів [20];

13) визначення вологості з використанням тестових методів (у т. ч. з добавками води) [21].

Проте з усіх представлених вище способів визначення вологості нафти тільки чотири дозволяють деяким чином враховувати вплив сорту нафти. До них відносяться способи груп 3, 8, 9 і 13.

У результаті ретельного вивчення переваг і недоліків кожного з представлених способів найбільшу зацікавленість викликав спосіб визначення вологості нафти з використанням тестових методів. Один з прикладів реалізації тестового методу представлений в роботі [22]. У цьому випадку пропонується проводити три виміри: діелектричної проникності

досліджуваної проби речовини; діелектричної проникності досліджуваної проби після добавки відомої кількості води і діелектричної проникності цієї ж проби після добавки до другої проби ще такої ж кількості води. Як показують результати розрахунків, такий спосіб дозволяє певною мірою виключити вплив початкової діелектричної проникності досліджуваного матеріалу (тобто компенсувати «сортову невизначеність»).

Мета статті. Метою статті є вибір найбільш ефективного способу, що дозволяє компенсувати основну складову невизначеності даних вологомірів – «сортову невизначеність». Цей вибір здійснюється шляхом проведення порівняльного аналізу тестових методів підвищення точності діелькометричних вологомірів. Основними вимогами при виборі способу є: забезпечення інваріантності вимірювань до зміни сорту речовини і можливість його застосування як в лабораторних, так і у виробничих умовах, як при вимірюваннях з обмеженим об'ємом матеріалу, так і в потоці. При цьому слід зазначити, що подібний аналіз для деяких способів, описаних у патентах, авторських свідоцтвах і наукових працях з даної тематики, вже проводився в попередніх публікаціях, однак позитивних результатів у плані вибору найбільш ефективного способу не приніс.

Основний матеріал дослідження. Для виконання поставленої у статті мети дослідження розглянемо наявні тестові методи підвищення точності діелькометричних вологомірів. В якості джерел інформації будемо використовувати патенти [23] і [24].

У патенті [23] вологість визначають шляхом вимірювання діелектричної проникності досліджуваної речовини і діелектричної проникності тієї ж речовини після введення в ємнісний датчик N діелектричних циліндрів.

В цьому випадку розрахунковий вираз для визначення вологості має вигляд:

$$W_{\text{погр}} = \frac{2W' C_{x1} - C_n}{3 C_{x2} - C_{x1}} - \frac{1}{3}, \quad (1)$$

де W' – величина, що визначає зміну ємності датчика при введенні в нього діелектричних циліндрів; C_{x1} – ємність датчика, заповненого досліджуваною речовиною; C_n – сумарна паразитна ємність; C_{x2} – ємність датчика, заповненого досліджуваною речовиною, при введенні в датчик діелектричних циліндрів.

Величина W' розраховується за формулою:

$$W' = \frac{N \cdot V_u}{V_o},$$

де N – кількість введених діелектричних циліндрів; V_u – об'єм введеного діелектричного циліндра; V_o – об'єм датчика.

Для отримання виразу (1) автори патенту в своїх розрахунках використовували спрощену формулу Вінера:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_n \cdot 1 + 3W,$$

де ε_1 – діелектрична проникність досліджуваної речовини; ε_n – діелектрична проникність зневодненого зразка речовини.

Однак відомо, що для реальних процесів зв'язок між вологістю речовини і її діелектричною проникністю найбільш точно може бути описаний залежністю (формула Вінера в повному вигляді):

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_n \left(1 + \frac{3W}{\frac{\varepsilon_e + 2\varepsilon_n}{\varepsilon_e - \varepsilon_n} - W} \right), \quad (2)$$

де ε_e – діелектрична проникність води (за довідковими даними дорівнює 80).

Таким чином, є необхідність перевірити, наскільки добре вираз (1) компенсує зміну вологості речовини при зміні її діелектричної проникності для реальних процесів, тобто згідно з виразом (2).

З цією метою визначимо значення ємностей C_{x1} та C_{x2} :

$$C_{x1} = g \cdot \varepsilon_1; \quad (3)$$

$$C_{x2} = g \cdot \varepsilon_2, \quad (4)$$

де g – просторова характеристика ефективного поля зазору, який утворений формою електродів обраного первинного вимірювального перетворювача (ПВП); ε_2 – діелектрична проникність досліджуваної речовини при введенні в ємнісний датчик діелектричних циліндрів.

Діелектричні проникності ε_1 та ε_2 можуть бути визначені як:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_n \left(1 + \frac{3W}{\frac{\varepsilon_e + 2\varepsilon_n}{\varepsilon_e - \varepsilon_n} - W} \right), \quad (5)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_n \left(1 + \frac{3 \left(W + \frac{2}{3} W' \right)}{\frac{\varepsilon_e + 2\varepsilon_n}{\varepsilon_e - \varepsilon_n} - W + W'} \right). \quad (6)$$

Для отримання числових значень вологості задамося деякими умовами. Автори патенту висувають наступні вимоги до діелектричних циліндрів:

- кількість циліндрів

$$N = 0,03 \dots 0,08 \cdot V_o / V_u;$$

- діаметр циліндра $d_u \leq 0,01 \cdot b$, де b – міжелектродна відстань;

- довжина циліндра дорівнює довжині конденсатора, тобто $h_u = h_o$.

Об'єм введеного діелектричного циліндра і об'єм датчика можна визначити за формулою:

$$V_d = \pi r_d^2 h_o; \quad V_u = \pi r_u^2 h_u,$$

де r_u і r_d – радіус циліндра і радіус датчика, дорівнюють відповідно $d_u / 2$ і $d_d / 2$.

Значення параметрів для розрахунку вологості і значення, отримані в результаті розрахунків, зведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Значення параметрів для розрахунку вологості

Для датчика				g , м	ε_e	C_n , пФ
b , м	d_d , м	h_o , м	V_o , м ³	10	80	0
0,076	0,08	0,06	$3,02 \times 10^{-4}$			
Для циліндрів						
d_u , м	h_u , м	V_u , м ³	N , шт.	10	80	0
$7,6 \times 10^{-3}$	0,06	$2,42 \times 10^{-8}$	554			

У розглянутому патенті в якості досліджуваної речовини обрано нафту. Як відомо, діелектрична проникність нафти варіюється в межах від 2 до 4. В такому випадку в якості контрольних точок для перевірки інваріантності виразу (1) задамо значення ε_n , що дорівнюють 2; 2,5; 3 і 3,5. При цьому

вологість будемо змінювати від 0 (0 %) до 0,3 (30 %) з кроком 0,1 (10 %).

Таким чином, підставивши вирази (5) в (3) і (6) в (4), а потім отримані значення в (1), отримаємо розрахункові значення вологості (табл. 2). Слід зазначити, що ці значення не є нормованими.

При збільшенні вологості речовини W розрахункове значення вологості $W_{розр}$ також повинне збільшуватися. Але в нашому випадку (табл. 2) монотонне зростання значень вологості відсутнє. Якщо говорити про інваріантність до зміни початкової діелектричної проникності речовини, то з табл. 2 видно, що, наприклад, для $\varepsilon_n = 2,0$ (при $W = 0$) розрахункове значення вологості становить 0,342, для $\varepsilon_n = 2,5$ $W_{розр} = 0,349$, для $\varepsilon_n = 3,0$ $W_{розр} = 0,355$ та для $\varepsilon_n = 3,5$ $W_{розр} = 0,362$, тобто вологість речовини залежить від її діелектричної проникності. Таким чином, в результаті аналізу способу, описаного в патенті [23], встановлено, що даний спосіб не вирішує проблему «сортової невизначеності» діелектричних вологомірів.

Таблиця 2 – Розрахункові значення вологості

ε_n	W	$W_{розр}$	ε_n	W	$W_{розр}$
2,0	0,0	0,342	3,0	0,0	0,355
2,0	0,1	0,35	3,0	0,1	0,363
2,0	0,2	0,346	3,0	0,2	0,36
2,0	0,3	0,331	3,0	0,3	0,346
2,5	0,0	0,349	3,5	0,0	0,362
2,5	0,1	0,356	3,5	0,1	0,37
2,5	0,2	0,353	3,5	0,2	0,367
2,5	0,3	0,338	3,5	0,3	0,353

У патенті [24] для визначення вологості рідинних середовищ проводять 3 вимірювання:

- досліджуваного зразка речовини;
- досліджуваного зразка речовини після фіксованої добавки в нього води;
- досліджуваного зразка речовини з фіксованою добавкою рідинного середовища того ж складу, що і речовина з заданою вологістю (або зневодненого середовища).

Таким чином, після трьох вимірів отримаємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = a + b \cdot W_1, \\ \varepsilon_2 = a + b \cdot W_2, \\ \varepsilon_3 = a + b \cdot W_3, \end{cases} \quad (7)$$

де ε_1, W_1 – діелектрична проникність і вологість досліджуваної проби речовини; ε_2, W_2 – діелектрична проникність і вологість досліджуваної проби речовини після добавки фіксованого об'єму води; ε_3, W_3 – діелектрична проникність і вологість досліджуваної проби речовини після добавки фіксованого об'єму середовища, що контролюється, відомої вологості (або зневодненого середовища).

У розглянутому патенті автори пропонують декілька варіантів отримання третього виміру. Розглянемо більш детально кожен із запропонованих варіантів.

Варіант 1. Для третього виміру фіксовану добавку речовини з відомою вологістю вводять в суміш, отриману після другого вимірювання. У цьому випадку система рівнянь (7) має вигляд:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = a + b \cdot W_1, \\ \varepsilon_2 = a + b \cdot k_1 \cdot W_1 + \Delta W_1, \\ \varepsilon_3 = a + b \cdot k_2 \cdot W_1 + \Delta W_1 + \Delta W_2 \cdot W_0, \end{cases} \quad (8)$$

де $\Delta W_1 = \Delta V_1 / V_0$ – відношення доданого фіксованого об'єму води до повного об'єму зразка; $k_1 = 1 / (1 + \Delta W_1)$ – коефіцієнт, прийнятий для спрощення запису виразу; $\Delta W_2 = \Delta V_2 / V_0$ – відношення доданого фіксованого об'єму середовища, що контролюється, відомої вологості до об'єму первинного зразка речовини; $k_2 = 1 / (1 + \Delta W_1 + \Delta W_2)$ – коефіцієнт, прийнятий для спрощення запису виразу; W_0 – вологість середовища, що контролюється.

Вирішуючи систему (8) відносно W_1 отримаємо:

$$W_1 = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2 \cdot k_1 \cdot \Delta W_1 + \varepsilon_1 - \varepsilon_2 \cdot k_1 \cdot \Delta W_1 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2 \cdot \Delta W_1 \cdot \Delta W_2 \cdot W_0 \cdot k_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2 \cdot k_2 - k_1 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3 \cdot k_1 - 1}. \quad (9)$$

Перевірка (9) на інваріантність проводиться з використанням наступних формул розрахунку діелектричної проникності:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_n \left(1 + \frac{3W_1}{\varepsilon_n + 2\varepsilon_n - W_1} \right), \quad (10)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_n \left(1 + \frac{3W_2}{\frac{\varepsilon_\theta + 2\varepsilon_n}{\varepsilon_\theta - \varepsilon_n} - W_2} \right), \quad (11)$$

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_n \left(1 + \frac{3W_3}{\frac{\varepsilon_\theta + 2\varepsilon_n}{\varepsilon_\theta - \varepsilon_n} - W_3} \right), \quad (12)$$

де $W_2 = W_1 + \Delta W_1$; $W_3 = W_2 + W_\theta / 2$.

В табл. 3 вказані вихідні дані для розрахунку вологості, взяті з прикладу, наведеного в патенті [24].

Таблиця 3 – Вихідні дані для розрахунку вологості

V_0 , л	ΔV_1 , л	ΔV_2 , л	W_θ	ε_θ
0,5	0,05	0,25	0,1	80

В якості контрольних точок задамо значення діелектричної проникності ε_n , що дорівнюють 2; 2,5; 3 і 3,5 та вологості W_1 , що дорівнюють 0; 0,1; 0,2 і 0,3. В табл. 4 наведені розрахункові значення діелектричних проникностей.

Таблиця 4 – Розрахункові значення діелектричних проникностей

ε_n	W_1	Діелектричні проникності		
		ε_1	ε_2	ε_3
2,0	0,0	2,0	2,614	2,614
2,0	0,1	2,614	3,368	2,971
2,0	0,2	3,368	4,317	3,368
2,0	0,3	4,317	5,545	3,814
2,5	0,0	2,5	3,252	3,252
2,5	0,1	3,252	4,173	3,688
2,5	0,2	4,173	5,324	4,173
2,5	0,3	5,324	6,806	4,714
3,0	0,0	3,0	3,885	3,885
3,0	0,1	3,885	4,963	4,396
3,0	0,2	4,963	6,305	4,963
3,0	0,3	6,305	8,022	5,596
3,5	0,0	3,5	4,512	4,512
3,5	0,1	4,512	5,741	5,095
3,5	0,2	5,741	7,262	5,741
3,5	0,3	7,262	9,197	6,459

Підставивши вирази (10), (11) і (12) в (9) отримаємо розрахункові значення вологості (табл. 5). Нормування цих значень включає в себе наступні етапи:

1) перехід $W_{\text{розн}}$ до області позитивних значень:

$$W_{\text{позит}} = W_{\text{розн}} - W_k,$$

де W_k – значення вологості в точці, в якій $W = 0$ і $\varepsilon_n = 3,5$;

2) суміщення діапазонів:

$$W_n = W_{\text{позит}} / W_{\text{позит n}} / W_{\text{макс}},$$

де $W_{\text{позит n}}$ – значення вологості в точці, в якій $W = 0,3$ і $\varepsilon_n = 3,5$ після переходу до області позитивних значень; $W_{\text{макс}}$ – максимальне значення вологості W , дорівнює 0,3.

Нормовані значення вологості наведені в табл. 5.

Таблиця 5 – Розрахункові значення вологості

ε_n	W_1	$W_{1 \text{ розп}}$	W_n
2,0	0,0	-0,925	0
2,0	0,1	-0,741	0,149
2,0	0,2	-0,629	0,24
2,0	0,3	-0,556	0,299
2,5	0,0	-0,925	0
2,5	0,1	-0,741	0,149
2,5	0,2	-0,629	0,24
2,5	0,3	-0,556	0,299
3,0	0,0	-0,925	0
3,0	0,1	-0,742	0,148
3,0	0,2	-0,629	0,24
3,0	0,3	-0,555	0,3
3,5	0,0	-0,925	0
3,5	0,1	-0,742	0,148
3,5	0,2	-0,629	0,24
3,5	0,3	-0,555	0,3

З табл. 5 видно, що отримані розрахункові значення вологості практично не залежать від зміни початкової діелектричної проникності речовини: при заданій вологості 0 для діелектричних проникностей 2,0; 2,5; 3,0 і 3,5 нормовані розрахункові значення вологості у всіх точках складають 0; при вологості 0,1 нормовані значення змінюються від 0,148 до

0,149 і т.д., тобто присутня інваріантність вимірювань.

Однак, якщо проаналізувати отримані в табл. 5 дані на наявність збіжності, то видно, що для дійсного значення вологості 0 при різних діелектричних проникностях отримаємо нормовані значення вологості 0 у всіх точках; для вологості 0,1 отримаємо величини 0,149; 0,149; 0,148; 0,148 і т.д. Як видно, не всі результати розрахунків збігаються з дійсними значеннями, тобто є відхилення. Цей факт свідчить про погану збіжність результатів. Максимальна розбіжність в цьому випадку становить 4,9 %.

Варіант 2. Для третього виміру фіксовану добавку речовини з відомою вологістю вводять у первинну суміш. Система рівнянь (9) може бути представлена в наступному вигляді:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = a + b \cdot W_1, \\ \varepsilon_2 = a + b \cdot k_1 \cdot W_1 + \Delta W_1, \\ \varepsilon_3 = a + b \cdot k_2' \cdot W_1 + \Delta W_2 \cdot W_0, \end{cases} \quad (13)$$

де $k_2' = 1 / (1 + \Delta W_2)$ – коефіцієнт, прийнятий для спрощення запису виразу.

Вирішуючи систему (13) відносно W_1 отримаємо:

$$W_1 = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2 \cdot \Delta W_2 \cdot W_0 \cdot k_2' - \varepsilon_1 - \varepsilon_3 \cdot \Delta W_1 \cdot k_1}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2 \cdot 1 - k_2' - \varepsilon_1 - \varepsilon_3 \cdot 1 - k_1} \quad (14)$$

Для перевірки (14) на інваріантність будемо використовувати формули (10), (11) і (12). Однак у цьому випадку $W_3 = W_1 + W_0 / 2$. В якості вихідних даних використовуємо значення з табл. 3.

Таким чином, в результаті розрахунків отримаємо значення діелектричних проникностей, представлені в табл. 6. Розрахункові значення вологості (табл. 7) можуть бути отримані шляхом підстановки виразів (10), (11) і (12) в (14).

Як і у випадку вимірювань за варіантом 1, результати розрахунків вологості, наведені в табл. 7, є інваріантними до зміни початкової діелектричної проникності. Але при цьому так саме, як і в попередньому випадку, присутня погана збіжність результатів. Максимальна розбіжність між отриманим нормованим значенням вологості та дійсним становить 3,8 %.

Таблиця 6 – Розрахункові значення діелектричних проникностей

ε_n	W_1	Діелектричні проникності		
		ε_1	ε_2	ε_3
2,0	0,0	2,0	2,614	2,292
2,0	0,1	2,614	3,368	2,614
2,0	0,2	3,368	4,317	2,971
2,0	0,3	4,317	5,545	3,368
2,5	0,0	2,5	3,252	2,858
2,5	0,1	3,252	4,173	3,252
2,5	0,2	4,173	5,324	3,688
2,5	0,3	5,324	6,806	4,173
3,0	0,0	3,0	3,885	3,422
3,0	0,1	3,885	4,963	3,885
3,0	0,2	4,963	6,305	4,396
3,0	0,3	6,305	8,022	4,963
3,5	0,0	3,5	4,512	3,983
3,5	0,1	4,512	5,741	4,512
3,5	0,2	5,741	7,262	5,095
3,5	0,3	7,262	9,197	5,741

Таблиця 7 – Розрахункові значення вологості

ε_n	W_1	$W_{1\text{ розр}}$	W_n
2,0	0,0	-0,034	0,001
2,0	0,1	0,1	0,138
2,0	0,2	0,192	0,232
2,0	0,3	0,257	0,298
2,5	0,0	-0,034	0,001
2,5	0,1	0,1	0,138
2,5	0,2	0,193	0,233
2,5	0,3	0,257	0,298
3,0	0,0	-0,034	0,001
3,0	0,1	0,1	0,138
3,0	0,2	0,193	0,233
3,0	0,3	0,258	0,299
3,5	0,0	-0,035	0
3,5	0,1	0,1	0,138
3,5	0,2	0,193	0,233
3,5	0,3	0,259	0,3

Варіант 3. Для третього виміру вводять фіксовану добавку зневодненого зразка речовини. Система рівнянь (9) матиме вигляд:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = a + b \cdot W_1, \\ \varepsilon_2 = a + b \cdot k_1 \cdot W_1 + \Delta W_1, \\ \varepsilon_3 = a + b \cdot k_2'' \cdot W_1, \end{cases} \quad (15)$$

де $k_2'' = 1 / (1 + \Delta W_2'')$ – коефіцієнт, прийнятий

для спрощення запису виразу; $\Delta W_2'' = \Delta V_{жс} / V_0$ – відношення доданого фіксованого об'єму зневодненого середовища, що контролюється, до об'єму первинного зразка.

В результаті розв'язання системи рівнянь (15) відносно W_1 отримуємо:

$$W_1 = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2 \cdot k_1 \cdot \Delta W_1''}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3 \cdot 1 - k_1 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2 \cdot 1 - k_2''}. \quad (16)$$

Перевірка (16) на інваріантність здійснюється, як і в попередніх випадках, з використанням формул (10), (11) і (12) за умови, що $W_3 = W_1 / 2$.

Розрахункові значення діелектричних проникностей для даного варіанту вимірювання наведені в табл. 8, а самі значення вологості та нормовані значення вологості – в табл. 9.

Таблиця 8 – Розрахункові значення діелектричних проникностей

ε_n	W_1	Діелектричні проникності		
		ε_1	ε_2	ε_3
2,0	0,0	2,0	2,614	2,0
2,0	0,1	2,614	3,368	2,292
2,0	0,2	3,368	4,317	2,614
2,0	0,3	4,317	5,545	2,971
2,5	0,0	2,5	3,252	2,5
2,5	0,1	3,252	4,173	2,858
2,5	0,2	4,173	5,324	3,252
2,5	0,3	5,324	6,806	3,688
3,0	0,0	3,0	3,885	3,0
3,0	0,1	3,885	4,963	3,422
3,0	0,2	4,963	6,305	3,885
3,0	0,3	6,305	8,022	4,396
3,5	0,0	3,5	4,512	3,5
3,5	0,1	4,512	5,741	3,983
3,5	0,2	5,741	7,262	4,512
3,5	0,3	7,262	9,197	5,095

З табл. 9 видно, що при заданому значенні вологості 0 для діелектричних проникностей 2,0; 2,5; 3,0 і 3,5 отримуємо нормовані значення вологості, що дорівнюють 0 у всіх точках; при вологості 0,1 для тих самих діелектричних проникностей нормовані значення вологості дорівнюють 0,136 у всіх точках. Аналізуючи таким чином інші дані табл. 9, можна відзначити, що невелика різниця в отриманих нормованих значеннях вологості виходить лише у точці $W_1 = 0,3$ (W_n змінюється від 0,295 до 0,3). В цьому випадку похибка, пов'язана з

«сортовою невизначеністю» дієлькометричних вологомірів, становить 0,005.

Таблиця 9 – Розрахункові значення вологості

0, ε_n	W_1	$W_{1\text{ розр}}$	W_n
2,0	0,0	-0,273	0
2,0	0,1	-0,244	0,136
2,0	0,2	-0,224	0,23
2,0	0,3	-0,21	0,295
2,5	0,0	-0,273	0
2,5	0,1	-0,244	0,136
2,5	0,2	-0,224	0,23
2,5	0,3	-0,21	0,295
3,0	0,0	-0,273	0
3,0	0,1	-0,244	0,136
3,0	0,2	-0,224	0,23
3,0	0,3	-0,209	0,3
3,5	0,0	-0,273	0
3,5	0,1	-0,244	0,136
3,5	0,2	-0,224	0,23
3,5	0,3	-0,209	0,3

Якщо говорити про збіжність отриманих результатів, то з табл. 9 видно, що, наприклад, при діелектричній проникності 2,0 для дійсного значення вологості 0 отримане нормоване значення також дорівнює 0, але вже для значення вологості 0,1 нормоване значення становить 0,136 (розбіжність – 3,6%). В інших точках для вологості 0,2 та 0,3 також бачимо розбіжності.

Таким чином, в результаті аналізу даних, отриманих для варіантів розрахунку вологості 1, 2 і 3, можна зробити наступні висновки щодо способу визначення вологості, описаного в патенті [24]:

а) даний спосіб дозволяє досить добре компенсувати сортову залежність дієлькометричних вологомірів, оскільки аналіз результатів розрахунків, отриманих після перевірки виразів (9), (14) і (16) на інваріантність з використанням повної формули Вінера, показав, що ці результати є інваріантними до зміни початкової діелектричної проникності речовини;

б) результати розрахунку вологості, отримані з використанням розрахункових виразів, наведених у патенті [24], показали погану збіжність, тобто отримані нормовані значення вологості не збігаються з дійсними. Максимальна розбіжність за трьома варіантами вимірювань становить 4,9%. Якщо врахувати, що в більшості випадків похибка дієлькометричних вологомірів не перевищує

0,5 %, то наявність такої розбіжності різко знижує точність даних вологомірів і є чинником, що свідчить не на користь розглянутого способу;

в) застосування даного способу пов'язано з певними труднощами його реалізації: не завжди можливо отримати зневоднене середовище, що контролюється, або добавку рідинного середовища того ж складу, що і сама речовина.

ВИСНОВКИ

Як видно з проведеного аналізу тестових методів підвищення точності діелькометричних вологомірів, інваріантність вимірювань забезпечується лише при проведенні розрахунку вологості за способом, що описаний у патенті [24]. Однак у цьому випадку не можна говорити про хорошу збіжність отриманих результатів з дійсними значеннями вологості. До того ж, цей спосіб досить важкий у реалізації або його здійснення взагалі не уявляється можливим (у випадку, якщо не можна точно визначити склад речовини, що контролюється).

Отже, питання забезпечення інваріантності з використанням тестових методів не можна вважати вичерпаним.

1. Сафонова Т. Ю. Классификация и характеристики маркерных сортов российской нефти [Электронный ресурс] / Т. Ю. Сафонова. – Режим доступа : <http://www.naans-media.ru/klassifikatsiya-i-kharakteristiki-markernykh-sortov-rossiyskoj-nefti.php>. – 19.12.2014 г. 2. Хуторянский Ф. М. Обезвоживание и обессоливание нефти [Электронный ресурс] / Ф. М. Хуторянский. – Режим доступа : <http://www.xutorkanskiy.ru/encyklopedia/2/2983.html>. – 19.12.2014 г. 3. ГОСТ Р 51858-2002. Нефть. Общие технические условия. – Введ. 08.01.2002. – М. : Изд-во стандартов, 2002. – 11 с. 4. Заболотный А. В. Нюансы компенсации «сортной» неопределенности при формировании тестов для адаптивных влагомеров / А. В. Заболотный // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – №2/9(56). – С. 47–50. 5. Берлинер М. А. Измерения влажности / М. А. Берлинер. – М. : Энергия, 1973. – 400 с. 6. Бромберг Э. М. Тестовые методы повышения точности измерений / Э. М. Бромберг, К. Л. Куликовский. – М. : Энергия, 1978. – 176 с. 7. Кондрашов С. И. Методы повышения точности систем тестовых впробувань электрических вимірювальних перетворювачів у робочих режимах: монографія / С. И. Кондрашов. – Харків : НТУ «ХПИ», 2004. – 224 с. 8. Пат. SU 1596921 СССР, МПК

G 01 N 42I, 9₅₁. Способ определения содержания воды в нефти, нефтепродуктах и эмульсиях / Мельник В. Д., Овчинников Л. Г. – № 795015/23-5; заявл. 17.09.62; опубл. 1964, Бюл. № 1. – 2 с. : ил. 9. Пат. SU 178569 СССР, МПК G 01 N 42I, 9₅₁. Способ определения содержания воды в нефти и нефтепродуктах / Овчинников Л. Г., Поцелуев А. Ф., Бурденко Ю. В.; заявитель и патентообладатель Волгоградский научно-исследовательский институт нефтяной и газовой промышленности. – № 877705/26-10; заявл. 23.01.64; опубл. 22.01.66, Бюл. № 3. – 1 с. 10. Пат. US 5073756 A США, МПК G 01 N 27/22. Method and apparatus for measuring the volumetric water content of mineral and/or organic mixtures / Alexander Brandelik; заявник і патентовласник Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH. – № US 07/543,133; заявл. 25.06.90; опубл. 17.12.91. – 6 с. : ил. 11. Пат. WO 2007/109772 A3 США, МПК G 01 N 27/22. Method and apparatus for detecting water in a fluid media / Agar Joram, Metsner Efim; заявник і патентовласник Agar Corp Ltd, Agar Joram, Metsner Efim. – № PCT/US2007/064702; заявл. 22.03.2007; опубл. 29.05.2008. – 13 с. : ил. 12. Пат. RU 2065603 C1 РФ, МПК G 01 N 27/22. Способ определения содержания воды в водонефтяной смеси нефтяных скважин / Бургунов С. А., Геризгорен В. А., Грачев А. Г.; заявитель и патентообладатель Конструкторское бюро Производственного объединения «Саратовнефтегаз». – № 93000564/25; заявл. 6.01.93; опубл. 20.08.96. – 4 с. 13. Пат. SU 337708 СССР, МПК G 01 N 27/22. Емкостной способ определения свободной воды в нефте-продуктах / Маряхин Н. М., Шимонаев Г. С. – № 1630979/26-25; заявл. 12.03.71; опубл. 5.05.72, Бюл. № 15. – 2 с. : ил. 14. Пат. SU 1749810 A1 СССР, МПК G 01 N 27/22. Способ измерения влажности / Рзаев Т. Б.; заявитель и патентообладатель Научно-исследовательский институт фотоэлектроники. – № 1630979/26-25; заявл. 3.07.89; опубл. 23.07.92, Бюл. № 27. – 4 с. : ил. 15. Пат. SU 1827614 A1 СССР, МПК G 01 N 27/22. Способ определения содержания воды в гидразиновом горючем / Авзалов А. Ф., Литвиненко А. Н., Маньшиев Д. А., Калякин А. В. – № 4922229/25; заявл. 28.03.91; опубл. 15.07.93, Бюл. № 26. – 3 с. 16. Пат. UA 75699 C2 Україна, МПК G 01 N 27/22. Спосіб вимірювання вологості [Текст] / заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 2004031999; заявл. 18.03.2004; опубл. 15.05.2006, Бюл. № 5. – 3 с. : ил. 17. Пат. UA 95572 C2 Україна, МПК G 01 N 27/22. Спосіб

- вимірювання об'ємного вмісту вологи / Куцевол О. М., Куцевол М. О.; заявник і патентовласник Куцевол О. М., Куцевол М. О. – № а201006989; заявл. 7.06.2010; опубл. 10.08.2011, Бюл. № 15. – 3 с.: іл. 18. Пат. RU 2168719 С1 РФ, МПК G 01 N 27/22. Способ измерения влажности и устройство для его реализации / Галушкин С. С.; заявник і патентовласник Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г. В. Плеханова (технический университет). – № 99120863/28; заявл. 29.09.99; опубл. 10.06.2001. – 8 с.: ил. 19. Пат. RU 2478943 С2 РФ, МПК G 01 N 27/22, E 21 B 49/10. Устройство и способ измерения содержания воды и концентрации соли в потоке многофазного флюида / КИРКЕУНЕ Одд Ян (NO); заявитель и патентообладатель ФМС Конгсберг Сабси АС (NO). – № 2010116122/04; заявл. 3.10.2008; опубл. 10.04.2013. – 14 с.: ил. 20. Пат. SU 1627964 А1 СССР, МПК G 01 N 27/22. Способ измерения влажности органических веществ / Исмагуллаев П. Р., Каландаров П. И., Тургунбаев А., Икрамов Г. И.; заявитель и патентообладатель Ташкентский политехнический институт им. А. Р. Бируни. – № 4663491/25; заявл. 20.03.89; опубл. 15.02.91, Бюл. № 6. – 2 с. 21. Пат. UA 104201 С2 Україна, МПК G 01 N 27/22. Спосіб вимірювання вологості матеріалів / Заболотний О. В.; заявник і патентовласник Національний аерокосмічний ун-т ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут». – № а201201992; заявл. 21.02.2012; опубл. 10.01.2014, Бюл. № 1. – 9 с.: іл. 22. Голуб К. Ю. Забезпечення інваріантності дієлькометричних вологомірів до зміни сорту матеріалу з використанням поліномів Лагранжа / К. Ю. Голуб, О. В. Заболотний, М. Д. Кошовий // Вісник НТУ «КПІ». – 2013. – №45. – С. 7–13. 23. Пат. SU 1265571 А1 СССР, МПК G 01 N 27/22. Способ измерения влажности нефти и нефтепродуктов/ Гридасов А. П., Шевченко В. Н.; заявитель и патентообладатель Калининградский технический ин-т рыбной промышленности и хозяйства и Ордена Ленина ин-т проблем управления (автоматики и телемеханики). – № 3905781/28-25; заявл. 4.06.85; опубл. 23.10.86, Бюл. № 39. – 3 с. 24. Пат. SU 1332216 А1 СССР, МПК G 01 N 27/22. Способ определения влажности жидких сред / Кудрявцев А. В., Лункин Б. В., Совлуков А. С., Шлемин А. В., Юсупов М. З.; заявитель и патентообладатель ин-т автоматики АН КиргССР. – № 3988926/31-25; заявл. 11.12.85; опубл. 23.08.87, Бюл. № 31. – 4 с.

Поступила в редакцію 13.04.2015р.

Рекомендували до друку: докт. техн. наук, проф. Кісіль І. С., докт. фіз.-мат. наук, проф. Снарський А. О.