

УДК 665.7

Й. Й. Білинський, д. т. н., проф.; К. В. Огородник, к. т. н., доц.; Н. А. Яремішена
АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ГУСТИНИ
НАФТОПРОДУКТІВ

Систематизовано та проаналізовано сучасні методи та засоби вимірювання густини нафтопродуктів, виявлено їх переваги та недоліки.

Розроблено нову вдосконалену класифікацію методів і засобів вимірювання густини нафтопродуктів, в основу якої покладено чотири основні класифікаційні ознаки, а саме: за методом; за різновидом реалізації методу; за засобами, що реалізують метод; за особливістю конструкції.

Обґрунтовано вибір найперспективнішого та найточнішого методу для контролю якості нафтопродуктів у заданих умовах. Таким методом є ультразвуковий, який, незважаючи на незначні недоліки (необхідність перед вимірюванням густини викачування повітря із пульп, оскільки повітряні бульбашки значно впливають на поглинання ультразвуку; ультразвукові густиноміри є досить вартісними), має безліч переваг над іншими, а саме: безінертність та безконтактність вимірювання; відсутність рухомих частин у потоці, втрат тиску в трубопроводах; можливість їхнього застосування для вимірювання густини забруднених і агресивних середовищ.

Ключові слова: густина, нафтопродукти, методи вимірювання, густиномір.

Густина є основним із фізико-хімічних параметрів, що визначають властивості та характеризують склад і структуру нафтопродуктів, норми густини регламентуються стандартом «Євро 5» [1, 2]. Визначення густини є одним із найбільш трудомістких вимірювальних процесів. Достатньо складно визначати цей параметр, контролюючи нафтопродукти під час їхнього виробництва, транспортування та використання, особливо в умовах швидкоплинних технологічних процесів. Прилади, призначені для вимірювання густини, називають густиномірами.

Густиною називають уміст маси речовини в одиниці займаного нею об'єму. Вона значно залежить від температури, зменшуючись за її зростання [3 – 5]:

$$\rho_{t1} = \rho_{t2} [1 - \beta(t_1 - t_2)] = \rho_{t2} (1 - \beta \Delta t),$$

де ρ_{t1} і ρ_{t2} – густина середовищ відповідно за робочої температури t_1 і за температури t_2 , кг/м³; β – коефіцієнт об'ємного теплового розширення речовини в інтервалі температур Δt .

Роль і значення густиномірів зростає з кожним роком [4]. Подальший розвиток технологій змінює й вимоги до густиномірів: на зміну громіздким ненадійним приладам приходять густиноміри, сумісні з іншими виробами мікроелектроніки. Основні вимоги до приладів, призначених для вимірювання густини: висока точність, однозначність показів, швидкодія, багатфункціональність, низька вартість, працездатність у екстремальних експлуатаційних умовах, надійність, довговічність.

Вимірювання густини нафтопродуктів має важливе значення на сьогодні, адже за значенням густини нафтопродукту можна робити висновки щодо його складу та якості, про домішки в ньому тощо. Сучасні методи та засоби вимірювання густини нафтопродуктів мають низку недоліків, тому є необхідність проаналізувати їх та обрати найактуальніший і найперспективніший для подальшого дослідження метод.

Мета роботи: оцінити переваги й недоліки сучасних методів і засобів вимірювання густини нафтопродуктів, а також обґрунтувати вибір найперспективнішого та найточнішого методу для контролю якості нафтопродуктів у заданих умовах.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

- здійснити огляд літературних джерел за вказаною тематикою, систематизувати та проаналізувати сучасні методи та засоби вимірювання густини нафтопродуктів, виявити їхні переваги та недоліки;
- розробити нову вдосконалену класифікацію методів і засобів вимірювання густини нафтопродуктів;
- обґрунтувати вибір найперспективнішого та найточнішого методу для контролю якості нафтопродуктів у заданих умовах.

Аналіз методів і засобів

У роботі на основі проведеного аналізу сучасних методів і засобів вимірювання густини нафтопродуктів [3 – 19] та вже наявної класифікації [20] розроблено нову, удосконалену класифікацію (рис. 1), в основу якої покладено чотири основні класифікаційні ознаки, а саме: за методом; за різновидом реалізації методу; за засобами, що реалізують метод; за особливістю конструкції.

Отже, за методом вимірювання розрізняють поплавково-ваговий, об'ємно-ваговий, гідростатичний, гідродинамічний, вібраційний, радіоізотопний, оптичний, ємнісний та акустичний густиноміри.

За різновидом реалізації методу виділяють пірометричний і гідростатичний; об'ємометричний, п'езометричний, адсорбційний, дилатометричний та пікнометричний; струминний, швидкісний, диференціальний та пневмометричний; центробіжний, турбінний, струминний і силовий; бета-, гама- та альфа-метод; амплітудний і частотний; швидкісний, імпедансний та швидкісно-імпедансний; поляриметричний, калориметричний, нефелориметричний і рефрактометричний; конденсаторний способи вимірювання густини нафтопродуктів.

Для реалізації кожного із цих способів використовують відповідні засоби вимірювання густини. Розглянемо детальніше кожен із цих методів.

Попларково-ваговий метод вимірювання густини нафтопродуктів

Попларково-ваговий метод ґрунтується на законі Архімеда. Згідно з цим методом проводять вимірювання виштовхувальної сили, яка діє на занурений у досліджувану рідину поплавок, після чого розраховують густину рідини на основі співвідношення [3 – 5]:

$$F(x) = \rho_0 g \int_{h-x}^h S(x) dx + \rho g \int_0^x S(x) dx ,$$

де ρ_0 – густина середовища над рідиною; g – прискорення вільного падіння; ρ – густина рідини, у яку занурена нижня частина поплавка; S – площа перетину поплавка.

Попларково-вагові густиноміри виготовляють або із частково зануреним, або з повністю зануреним поплавком [5, 7]. У приладах першого типу мірою густини нафтопродуктів служить глибина занурення поплавка визначеної форми й постійної маси [4, 6]. У густиномірах другого типу глибина занурення поплавка практично постійна, тому вимірюють діючу на поплавок виштовхувальну силу, що пропорційна густині нафтопродуктів.

За різновидом реалізації методу в попларково-вагових густиномірах можна виділити пірометричні та гідростатичні густиноміри. Засоби, що реалізують пірометричний метод називають пірометрами, до них належать спиртометри, цукрометри, клейметри, гідрометри, нафтоденсиметри, лактоденсиметри, урометри тощо. Для реалізації попларково-вагового гідростатичного методу використовують: ареометричні ваги (звичайні, із тонкою голкою, із термостійкого матеріалу), модифіковані ваги (із використанням «макету» або двох однакових за масою й об'ємом поплавків), гідростатичні ваги (коромисло з надрізом і без надрізу, із подвійною чашею, із рівноплечовим коромислом) та коромислові ваги (із циліндричним скляним поплавком, із поплавком у вигляді шару, циліндра, кулі; пружні, флотаційні, тензорезистивні, електромагнітні) [3, 5, 7].

Ареометричні ваги представляють собою металевий або скляний ареометр постійного об'єму, до корпусу якого знизу прикріплена додаткова тарілка (чашка). На середній частині стержня нанесена шкала або одна кільцева мітка. Вимірювання густини за допомогою ареометричних ваг описано в [5 – 7].

Похибка вимірювань становить приблизно ± 1 кг/м³. Вищу точність можуть забезпечити вдосконалені ваги, стрижень яких виконаний із тонкої голки (діаметром 0,2 – 0,3 мм) [5, 8].

До переваг ареометричних густиномірів належать [4 – 8]: можливість отримання більшої точності вимірювання за рахунок використання стрижня, який виконаний із тонкої голки; можливість використання за високих температур.

А недолік полягає в підбиранні потрібної маси гир під час триразового зважування, необхідності використання додаткового шару масла.

Модифіковані ваги оснащені найпростішим додатковим пристроєм [4, 7], а підставку під циліндр виготовляють із будь-якого матеріалу і встановлюють так, щоб чашка ваг могла вільно пересуватися вниз і вгору. Точніші результати можуть бути отримані на вагах, установлених так, щоб рідина розміщувалася під вагами [8]. Принцип роботи модифікованих ваг описано в роботах [3 – 5].

Переваги модифікованих ваг: можливість отримання кращих результатів вимірювання за рахунок розміщення рідини під вагами; регулювання температури ванни шляхом додавання невеликої кількості гарячої води або льоду, або ж термостату.

До незначного недоліку належить використання ванн із великим об'ємом води.

Широке використання для вимірювання густини рідин і твердих тіл мають коромислові

ваги [6]. Вони є простими за конструкцією і зручні в обслуговуванні приладами.

Істотна їхня перевага полягає в тому, що для вимірювання потрібно порівняно невелика кількість речовини. Похибка вимірювання $\pm (0,05-0,1)\%$. Розрахунки похибок і показань коромислових густиномірів наведені в [4, 6].

Серед виробників густиномірів, принцип роботи яких ґрунтується на поплавково-ваговому методі, відомі компанії: ОАО «Геотрон» (Росія), група компаній «АТОМ» (Росія), Chi-da-vin-chi Ventures (Нігерія), TOBIAS Associates (США).

Об'ємно-ваговий метод вимірювання густини нафтопродуктів

Згідно з об'ємно-ваговим методом деякий постійний об'єм середовища, що аналізують, неперервно зважують, а потім розраховують густину цього середовища за співвідношенням [4]:

$$\Delta G = 0,25\pi d^2 (\pi R + 2L)(\rho - \rho_0)g,$$

де d — внутрішній діаметр труби; R — радіус вигину труби; ρ_0 — початкове значення густини речовини; ρ — поточне значення густини речовини.

Причому зміна ваги відповідає зміні густини [6 – 9].

Для цього методу характерні незалежність показів від властивостей середовища (поверхневий натяг, в'язкість, наявність твердих часток тощо) і параметрів контрольованого потоку (швидкість руху через чутливий елемент, тиск, пульсація витрати і тиску тощо).

Цей метод вимірювання густини нафтопродуктів реалізується об'ємно-ваговими густиномірами, які за різновидом реалізації методу поділяють на об'ємометричні, п'езометричні, адсорбційні, пікнометричні та дилатометричні способи.

Для реалізації вищенаведених способів вимірювання густини нафтопродуктів використовують відповідно такі засоби: об'ємоміри (скляні, колбоподібні, кулястої форми, U -подібні, циліндричні), п'езометри (з міткою, піпеткоподібні, кранові, безкранові, капілярні), адсорбційні густиноміри (скляні, металеві), ареопікнометри (постійного та змінного вмісту) та мікропікнометри (скляні, кварцові, графітові, металеві), дилатометри (циліндроподібні, колбоподібні).

Існує багато різновидів пікнометрів, і їхнє застосування визначається родом досліджуваної речовини, її кількістю, а також необхідною точністю вимірювання [7, 8].

Зменшення похибки вимірювання до $\pm 0,0001\%$ забезпечується диференціальним пікнометричним методом, який ґрунтується на застосуванні двох пікнометрів із капілярною шийкою, що мають, по можливості, однаковий об'єм. Принцип роботи цього пікнометра описаний у [7].

Ареопікнометри – це один із різновидів пікнометрів. Їх використовують для вимірювання густини рідин малих об'ємів (наприклад, під час аналізу крові). На відміну від звичайного ареометра, в ареопікнометра показання на шкалі зростають знизу вгору [4, 6].

Різноманітні конструкції нестандартних пікнометрів описані в роботах [3, 5, 7].

До переваг пікнометрів належить можливість отримання більшої точності вимірювання за рахунок використання пікнометрів малого об'єму. Зі зростанням об'єму пікнометра для рідин і газів зменшується відносна похибка зважування, але водночас збільшується помилка, пов'язана з нерівномірністю температури по всій масі рідини (газу).

Дилатометри представляють собою калібрований посуд циліндричної чи колбоподібної форми з вузькою горловиною, на якій є кільцева мітка. Посуд заповнюють досліджуваною рідиною з відомою масою, а її об'єм визначають шляхом вимірювання висоти рівня відносно позначки за допомогою катетометра, а шукану густину визначають за формулою, наведеною в роботах [4, 6, 8].

П'езометри призначені для дослідження залежності густини від тиску і температури.

Існують п'єзометри постійного і змінного об'єму. Під час роботи з п'єзометрами першого типу вимірюють масу досліджуваної рідини, яка є змінною величиною, що залежить від тиску і температури, тоді як попередньо визначений об'єм п'єзометра залишається постійним. У п'єзометрах другого типу вимірюється маса досліджуваної речовини постійна, а її об'єм змінюється зі зміною температури і тиску. Густина за різних температур визначають за співвідношенням, наведеним у [9]. П'єзометри постійного об'єму застосовують для роботи з газами й парами, які за кімнатних умов перебувають у рідкому стані. Похибка вимірювання таких приладів складає $\pm 0,2\%$ [8]. У п'єзометрах змінного вмісту вимірювання об'єму досліджуваної рідини, маса якої відома, можна фіксувати різними способами, описаними в [3 – 7]. Основний недолік цього п'єзометра пов'язаний із контактом ртуті з рідиною, що обмежує його використання з погляду температурного діапазону.

До густиномірів, принцип роботи яких ґрунтується на об'ємно-ваговому методі, належать також адсорбційні прилади. Зазвичай ці густиноміри використовують для вимірювання густини пари. Схема такого густиноміру та її основні компоненти наведені в [7]. Похибка адсорбційних густиномірів до $\pm 0,1\%$.

Об'ємоміри бувають для твердих тіл і газів. Найпростішими рідинними об'ємомірами є вимірювальні циліндри, бюретки, мікробюретки, мензурки. Принцип їх роботи наведено в [9].

До числа переваг рідинних об'ємомірів належать простота і швидкість вимірювання густини. У польових умовах вони незамінні під час досліджування пористих і тонкозернистих речовин. Але ці прилади значно поступаються за точністю пікнометрам. Варто зазначити, що точність вимірювання тим вище, чим більший об'єм досліджуваного тіла [10].

Основні переваги об'ємно-вагового методу й густиномірів на його основі: можливість застосування для пульп, суспензій, забруднених, в'язких і летучих речовин; незалежність показань від властивостей і швидкості протікання рідини; можливість вимірювання за підвищеного тиску ($25 \text{ кгс/см}^2 \approx 2,5 \text{ МПа}$); постійний поперечний переріз вимірювальної ділянки пристрою, що виключає осадження твердих частинок, які містяться в потоці; висока чутливість і мала похибка (від 100 до 2000 кг/м^3). Обмеження галузі застосування об'ємно-вагових густиномірів пов'язане з недопустимістю газових частинок у рідині.

Виробниками густиномірів, принцип роботи яких ґрунтується на об'ємно-ваговому методі, є такі компанії «Spectro» (США), «Euro Sistem Srl» (Італія), «Dexter King Ventures Ltd» (Нігерія).

Гідростатичний метод вимірювання густини нафтопродуктів

Гідростатичний метод ґрунтується на вимірюванні перепаду тиску стовпа рідини на дросельному елементі за постійної висоти та визначення густини нафтопродукту [3, 8].

Принцип роботи гідростатичних густиномірів ґрунтується на тому, що тиск p у речовині на відстані H від її поверхні визначають виразом, наведеним у [8].

У гідростатичних густиномірах тиск стовпа речовини зазвичай вимірюють непрямим методом безперервного продування через речовину інертного газу (повітря), тиск якого пропорційний тискові стовпа речовини (п'єзометричні густиноміри) [4, 8].

Розрізняють такі основні види гідростатичних густиномірів: диференціальні та струминні (із безпосереднім вимірюванням тиску стовпа рідини), швидкісні (із вимірюванням стовпа рідини непрямим шляхом), а також пневмометри (із неперервним продуванням газу).

До пневмометрів належать прилади, принцип дії яких ґрунтується на вимірюванні тиску, необхідного для відриву бульбашки газу від краю трубки, вертикально зануреної у випробувану рідину [9, 10].

У диференціальних густиномірах використовують дві U -подібні трубки з однаковим

діаметром, в одну з яких наливають досліджувану рідину густиною ρ , а в другу – рідину (контрольна) з відомою густиною ρ_k , водночас створюють деяку різницю тисків. Похибка густиномірів приблизно $\pm 0,2\%$ [9].

Під час вимірювання густини газів широко використовують струминні густиноміри, принцип дії яких ґрунтується на залежності між густиною газу і швидкістю його витікання з отвору [10]. Похибка вимірювання струминних густиномірів визначається його конструкцією і складає близько $\pm 1\%$. Принцип роботи струминних густиномірів наведено в [11].

Більш надійні результати забезпечує дводзвінковий густиномір, що представляє собою два однодзвінкових пристрої в одному корпусі [9, 11]. Один дзвінок призначений для роботи з повітрям, другий – із досліджуваним газом. Форма, вага і об'єм дзвінків однакові. Завдяки рівності розмірів дзвінків та часу витікання газу визначення відносної густини зводиться до вимірювання переміщення дзвінка [4, 8].

Переваги дводзвінкового густиноміру полягають у спрощенні і пришвидшенні вимірювання, непотрібності вимірювати час і робити перерахунок на сухий стан, полегшуються перевірка й налаштування пристрою [5 – 10]. Під час вимірювання густини досить малих проб рідини використовують крапельний метод, який ґрунтується на тому, що швидкість падіння краплі рідини в іншу, не змішувану з нею рідину меншої густини, збільшується з ростом густини досліджуваної рідини [9 – 11].

Особливу увагу варто приділити суворо вертикальній установці циліндра. Час падіння краплі вимірюють секундоміром із похибкою $\pm(0,1 - 0,2)$ с. Вимірювання проводять 5 – 6 разів і визначають середнє значення. Крапельний метод може забезпечувати вимірювання густини з похибкою $\pm(0,001 - 0,05)\%$ [5 – 7].

Застосування цього гідростатичного швидкісного густиноміру має низку обмежень [3 – 9]:

- діапазон вимірювання в одній рідині невеликий – різниця густин краплі й речовини не повинна перевищувати $0,05 \text{ г/см}^3$, тому для дослідження групи різних рідин потрібно приготувати й випробувати багато контрольних рідин;

- можуть бути труднощі під час пошуку речовини, яка задовольняла б наведені вище вимоги й була б достатньо близькою за густиною до досліджуваної речовини;

- для зменшення конвекційних струмів необхідна сувора постійність температури.

Швидкісний густиномір досить зручний для швидких систематичних визначень невеликих вимірювань густини (наприклад, у медицині під час контролю параметрів крові).

Виробники гідростатичних густиномірів: компанія «Markbiz Nigeria» (Нігерія), фірма «Cole Mills Limited» (США), група компаній «Motormonitor s. c. Jaroslaw Labich, Piotr Lukaszewski» (Польща).

Вібраційний метод вимірювання густини нафтопродуктів

Вібраційний метод полягає у вимірюванні частоти власних коливань резонатора в автоколивальному режимі та в подальшому розрахунку густини речовини, що залежить від коливань резонатора за таким виразом [3, 9]:

$$f = \frac{\lambda^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{ml^3}},$$

де λ — постійна, залежна від умов закріплення трубки; E — модуль пружності матеріалу трубки; I — момент інерції поперечного перерізу трубки; m і l — маса і довжина трубки.

До вібраційних густиномірів належать прилади, принцип роботи яких ґрунтується на залежності між параметрами гнучких коливань, що надходять до труби (посудини) із досліджуваною речовиною або тіла, зануреного в ній, з однієї сторони, і густиною речовини – з іншої.

Вібраційні густиноміри можна поділити на такі засоби, що реалізують цей метод [12, 13]:

1. Амплітудні густиноміри, у яких мірою густини є амплітуда коливань резонатора за постійної його резонансної частоти. Зміна густини зумовлює відхилення від резонансу й зміну амплітуди. Оскільки амплітуда коливань резонатора визначається не тільки його параметрами, але й низкою інших чинників (потужністю імпульсу, швидкістю потоку рідини), точність вимірювання цієї групи обмежена [12].

2. Частотні густиноміри, у яких вимірюють функціонально зв'язану з густиною речовини частоту власних коливань резонатора, що створює разом із приводом (системою збудження) і системою зворотного зв'язку електромеханічний генератор. Через те, що вимірювання частоти залежить тільки від параметрів резонатора (форми, розмірів, модуля пружності, маси резонатора і речовини в ньому) і не залежить від амплітуди, частотні густиноміри мають порівняно з амплітудними вищі метрологічні характеристики, а також перевершують їх у зручності обробки вихідного сигналу, тобто за конструктивно-експлуатаційними показниками.

Рівність, наведена в роботі [13], є градуовальною характеристикою вібраційних густиномірів із трубчастими резонаторами. Як правило, градуовальна характеристика лінеаризується у вимірюваному інтервалі густин; при цьому похибка лінійності визначається шириною шкали і способом лінеаризації. У деяких випадках вібраційні густиноміри постачають спеціалізованою електронною приставкою, яка лінеаризує градуовальну характеристику [8].

Чутливими елементами вібраційних густиномірів служать трубки, циліндри або пластини, закріплені в нерухомих основах, які приводяться в автоколивальний режим руху системою збудження [9].

Серед основних переваг, що зумовлюють зростаюче розповсюдження частотних густиномірів, необхідно відзначити високу точність, чутливість і надійність, безпосереднє перетворення шуканої густини в частотний вихідний сигнал, можливість застосування за високих тисків для широкої номенклатури контрольованих середовищ (газів, речовин).

Разом із тим частотні густиноміри мають і недоліки, до яких належать обмеження допустимих витрат рідини, що визначається площею перерізу проточного каналу, нелінійність шкали, необхідність спеціальних засобів для компенсації впливу температури і тиску на параметри резонатора [5, 7, 13].

Компаніями, які займаються виробництвом вібраційних густиномірів, є: ОАО «Геотрон» (Росія), група компаній «АТОМ» (Росія), «Chi-da-vin-chi Ventures» (Нігерія), TOBIAS Associates (США).

Радіоізотопний метод вимірювання густини нафтопродуктів

Радіоізотопний метод полягає у вимірюванні ослаблення проникаючої радіації під час проходження через досліджувану речовину та в подальшому розрахунку густини речовини [12]. Під час фотопоглинання й комптонівського розсіювання розглядаються промені з енергією менше 1 МеВ.

Радіоізотопний метод вимірювання густини і прилади на його основі застосовують для неперервних вимірювань. Радіоізотопні густиноміри належать до безконтактних приладів (чутливий елемент не вводять у рухоме вимірювальне середовище), і їх доцільно застосовувати для вимірювання густини агресивних чи дуже в'язких речовин, пульп і речовин, що перебувають під високим тиском чи мають високу температуру в трубопроводах великого діаметра, але тільки в тих випадках, коли інші, розглянуті вище густиноміри, не застосовуються [3 – 5, 9 – 11].

У радіоізотопних густиномірах використовують три види ядерного випромінювання: альфа, бета і гама. Альфа-випромінювання має малу довжину пробігу частинок, і тому

використовується тільки в густиномірах для газів [13]. Бета- і гама-випромінювання застосовують у густиномірах для рідин і твердих тіл. Бета-випромінювання представляє собою потік електронів чи позитронів, що випускаються ядрами атомів і рухаються зі швидкістю, яка близька до швидкості світла. Гама-випромінювання – це електромагнітні коливання з дуже малою довжиною хвилі до $4 \cdot 10^{-11}$ м. Гама-промені характеризуються значно більшою проникаючою здатністю порівняно з бета-частинками.

Проходження гама-променів через речовину супроводжується ослабленням їхньої інтенсивності (енергія випромінювання переходить в інші форми енергії). Вимірювання густини речовини в трубопроводах і резервуарах із допомогою гама-випромінювання можливо двома способами, описаними в роботах [9 – 12].

Важливою перевагою цих густиномірів є можливість контролю густини речовини у важкодоступних місцях. Недоліком радіоізотопних густиномірів є залежність показань від фізичних властивостей досліджуваної речовини, що потребує індивідуального градування пристрою для визначення виду речовини.

Виробники радіоізотопних густиномірів: компанії «АТОМ» (Росія), «Spectro» (США), «Euro Sistem Srl» (Італія), група компаній «Motormonitor s. c. Jaroslaw Labich, Piotr Lukaszewski» (Польща).

Оптичний метод вимірювання густини нафтопродуктів

Оптичний метод вимірювання густини нафтопродуктів полягає в захопленні світла рухомим середовищем (ефект Фізо – Фрінелі) чи в розсіюванні світла рухомими частинками (ефект Доплера) [13].

За різновидом реалізації методу виділяють поляриметричний, калориметричний, нефелометричний та рефрактометричний густиноміри.

Засоби, що реалізують цей метод, поділяють на поляриметри, калориметри, нефелометри та рефрактометри [12, 14].

Поляриметр – прилад, призначений для вимірювання кута обертання площини поляризації, зумовленої оптичною активністю прозорих середовищ, розчинів і рідин [13, 14]. У широкому сенсі поляриметр – це прилад, що вимірює параметри поляризації частково поляризованого випромінювання (у цьому сенсі можуть вимірюватися параметри вектора Стокса, ступінь поляризації, параметри еліпса поляризації частково поляризованого випромінювання); застосовується для вивчення структури й властивостей речовини; має прикладне застосування в лабораторіях харчової, хімічної промисловості та інших галузях науки й виробництва для визначення концентрації розчинів оптично активних речовин, таких як: цукор, глюкоза, білок – по куту обертання площини поляризації [8, 10, 13]. Також він дозволяє спостерігати й вимірювати залишкові напруги у склі. За особливістю конструкції розрізняють такі поляриметри: призма Аренса, призма Волластона, призма Глана – Фуко, призма Тейлора та призма Ніколя.

Калориметр – прилад для вимірювання кількості теплоти, що виділяється або поглинається в будь-якому фізичному, хімічному або біологічному процесі [10 – 12]. Сучасні калориметри працюють у діапазоні температур від 0,1 до 3500 °С і дозволяють вимірювати кількість теплоти з точністю до 0,01 – 10%. Пристрій калориметр дуже різноманітний і визначається характером і тривалістю процесу, що вивчається, областю температур, за яких проводять вимірювання, кількістю вимірюваної теплоти й необхідною точністю. Калориметри за особливістю конструкції розрізняють [11, 13] рідинні, масивні, одинарні, подвійні (диференціальні).

Нефелометр – оптичний прилад, призначений для вимірювання ступеня каламутності рідин і газів за інтенсивністю розсіювання ними світла [14, 16]. Дія нефелометра ґрунтується на зіставленні інтенсивності двох світлових потоків: одного – від розсіювання суспензії, іншого

– від еталону (наприклад, каламутне скло). Нефелометри поділяють на мутноміри, димоміри. Вони застосовуються під час дослідження дисперсних систем [17].

Рефрактометр – прилад, що вимірює показник заломлення світла в середовищі [17, 18]. Існує велика кількість типів рефрактометрів, що мають різну конструкцію й технічні дані. Вони призначені для розв'язання різноманітних науково-дослідних і виробничо-технологічних задач. Рефрактометри бувають портативні, лабораторні, промислові.

Виробниками густиномірів, принцип роботи яких ґрунтується на оптичному методі, є такі компанії: «Spectro» (США), «Euro Sistem Srl» (Італія), «Dexter King Ventures Ltd» (Нігерія).

Ємнісний метод вимірювання густини нафтопродуктів

Ємнісний метод ґрунтується на вимірюванні ємності конденсатора, утвореного зануреним у середовище електродом і середовищем, яке безпосередньо контролюють [13].

Параметр матеріалу, що характеризує здатність матеріалу утворювати ємність, називається діелектричною проникністю й показує, у скільки разів збільшується ємність конденсатора, коли між пластинами конденсатора внести даний матеріал, не змінюючи габаритів конденсатора, порівняно з вакуумом [13, 17]. Записавши вирази, що визначають опір та ємність ділянки ізоляції, і перемноживши праві й ліві частини, отримаємо [18]:

$$R = \frac{\rho}{l}, \quad C = \varepsilon_0 \varepsilon l,$$

звідки

$$CR = \varepsilon_0 \varepsilon \rho.$$

де C і R – опір та ємність ділянок ізоляції; ε_0 – електрична постійна; ε – діелектричний проникність; l – приведена довжина конденсатора; ρ – густина середовища.

Із виразу видно, що ємність конденсатора не залежить від габаритів і форми конденсатора, а залежить винятково від ε та ρ .

Густиноміри такого типу можуть застосовуватися для вимірювання як неелектропровідних, так і електропровідних рідин. Вони придатні для вимірювання густини в широкому діапазоні тисків і температур агресивних і неагресивних середовищ. Їх покази залежать від діелектричної проникності середовища, яка може змінюватися з температурою. Застосування компенсаційних ємностей дозволяє істотно зменшити цей вплив, але не виключає його цілком [11, 13]. Електронна схема ємнісних густиномірів достатньо складна, що обмежує їх широке поширення.

Для рідких електропровідних середовищ застосовують первинні перетворювачі з одним електродом, покритим ізоляційним шаром. Роль другого електрода відіграє контрольоване середовище.

Для вимірювання рівня неелектропровідних середовищ використовують первинний перетворювач із двома неізольованими електродами [10, 12, 16].

Переваги ємнісних густиномірів: простота, зручність монтажу та обслуговування, надійність і потенційно висока точність (відомі ємнісні густиноміри, основна похибка яких не перевершує 0,1 – 0,2%). Ємнісні густиноміри мають широке застосування в промисловості. До недоліків ємнісних густиномірів належать: висока чутливість до зміни електричних властивостей рідин, зумовлена зміною їхнього складу, температури тощо, поява на елементах датчика електропровідної плівки внаслідок хімічної активності рідини, конденсації її пари, налипання самої рідини на контактні елементи.

Серед виробників густиномірів, принцип роботи яких ґрунтується на ємнісному методі, відомі компанії: ОАО «Геотрон» (Росія), група компаній «АТОМ» (Росія), Chi-da-vin-chi Ventures (Нігерія), TOBIAS Associates (США).

Ультразвуковий (акустичний) метод вимірювання густини нафтопродуктів

Ультразвуковий (акустичний) метод ґрунтується на вимірюванні швидкості потоку речовини або газу з використанням ультразвуку [6, 8, 13].

Звукові коливання високої частоти (20 кГц і вище), що створюються електроакустичним вібратором (випромінювачем), проходять через середовище й реєструються приймачем, розташованим від випромінювача на відстані D .

Застосування ультразвуку для вимірювання густини речовини є новим і перспективним напрямком розвитку густиномірів.

Ультразвуковий (акустичний) метод вимірювання густини речовини та прилади на його основі використовуються зазвичай для неперервних вимірювань. Акустичні густиноміри за різновидом реалізації методу поділяються на імпедансні, швидкісні та імпедансно-швидкісні густиноміри. Принцип роботи цих приладів описано в роботах [8, 10, 14].

Акустичні густиноміри являють собою засоби вимірювання, у яких вихідний сигнал вимірювальної інформації залежить від акустичних властивостей аналізованої речовини.

Швидкість поширення поздовжніх акустичних коливань у речовині визначають [15]:

$$C = \sqrt{K / \rho} = \sqrt{1 / \chi \rho},$$

де K – модуль всебічного стиску, Па; χ – коефіцієнт стиснення, м²/Н.

Із виразу видно, що за швидкістю звуку можна робити висновки про густину досліджуваної речовини [13, 14].

Поширення ультразвукових хвиль у будь-якому середовищі також супроводжується поглинанням звукової енергії, що характеризується коефіцієнтом поглинання a . Інтенсивність ультразвуку I під час проходження відстані d зменшується за експоненціальним законом:

$$I = I_0 e^{-2ad},$$

де I_0 – початкова інтенсивність ультразвуку, Вт/м².

Швидкісні УЗ-густиноміри призначені в основному для однорідних речовин, бінарних розчинів, сумішей речовин і газів [14, 16]. Серед цих густиномірів можна відзначити такі різновиди. Часово-імпульсний густиномір, який ґрунтується на вимірюванні зміни часу розповсюдження УЗ-коливань у контрольованому середовищі залежно від зміни його густини. Принцип роботи фазового густиноміру полягає у вимірюванні фази УЗ-коливань (неперервних або амплітудо-модульованих), що пройшли через середовище [15, 17]. Інтерферометричний густиномір побудований на вимірюванні довжини хвилі УЗ-коливань за акустичним резонансом стовпа середовища заданої висоти, коли в ньому укладається ціле число півхвиль. Резонансний густиномір характеризується тим, що в шарі середовища між двома плоскопаралельними поверхнями, одна з яких межує з випромінювачем, що пов'язаний зі широкосмуговим електричним генератором, а інша є відбивачем, створюється стояча хвиля [18]. У густиномірах з акустичним фільтром використаний ефект зміни спектра УЗ-імпульсу під час поширення його в контрольованій рідині через розміщений у ній твердий шар. В автоциркуляційному густиномірі визначають величину, зворотну часу поширення УЗ-коливань у середовищі. Цією величиною є частота автоциркуляції в електроакустичній замкнутій системі [17, 19]. Густиномір зі швидкісною реакцією хвилеводу ґрунтується на використанні ефекту зміни швидкості поширення УЗ-коливань уздовж твердого шару від густини рідини, що стикається з цим шаром. Твердим шаром зазвичай служить стінка трубопроводу або резервуара з контрольованим середовищем. Принцип роботи швидкісних УЗ-густиномірів детальніше описаний у роботах [6, 8, 10, 14].

Імпедансними густиномірами вимірюють густину однорідних твердих і газоподібних

речовин, бінарних розчинів і сумішей рідин або газів [17, 20]. Застосування цих густиномірів передбачає, що відома (або попередньо визначена) залежність між опором і густиною речовини. Одна зі схем імпедансного густиноміру [19] ґрунтується на визначенні еквівалентного опору випромінювання п'єзоелемента з відомою площею. Якщо контакт із середовищем не допускається [17], приймач розташовують на проміжному звукопроводі, через який УЗ-коливання випромінювача передаються середовищу і приймачу.

Одним із різновидів імпедансних густиномірів є диференційний густиномір, у якому вимірюють різницю акустичних тисків, що утворюються ідентичними випромінювачами в контрольованому середовищі і допоміжному середовищі із відомим опором [19 – 20]. Густиномір з імпедансною реакцією хвилеводу ґрунтується на експоненційному згасанні УЗ-хвилі Лемба у твердому шарі (хвилеводі), що контактує з контрольованим середовищем. Значного розвитку набули УЗ-густиноміри, які ґрунтуються на поглинанні звукової енергії та на швидкості поширення звуку. Принцип дії імпедансних густиномірів детальніше розглядають у [5 – 8, 11 – 18].

Із розглянутих імпедансних густиномірів найбільшу чутливість мають прилади з проміжним шаром та імпедансною реакцією хвилеводу.

Імпедансно-швидкісні густиноміри, у яких поєднуються описані вище різновиди імпедансних і швидкісних способів вимірювання, є перспективними завдяки можливості застосування для широкої номенклатури різних речовин і безконтактності вимірювання [17].

Інші схеми УЗ-густиномірів та їхні елементи наведено в роботах [6 – 8, 18 – 20]. Залежно від схеми й конструкції УЗ-густиномірів їхня приведена похибка коливається від $\pm 1,5$ до $\pm 3\%$.

Широкому розповсюдженню акустичних (ультразвукових) густиномірів сприяють такі переваги [17 – 20]: висока чутливість; можливість їхнього застосування для вимірювання густини забруднених і агресивних середовищ; безінертність та безконтактність вимірювання; відсутність рухомих частин у потоці; відсутність втрат тиску в трубопроводах та ін.

Ультразвуковий метод вимірювання густини має незначні недоліки, які пов'язані з необхідністю перед вимірюванням густини викачування повітря із пульп, оскільки повітряні бульбашки значно впливають на поглинання ультразвуку; із вартістю УЗ-густиномірів.

Серед виробників густиномірів, принцип роботи яких ґрунтується на ультразвуковому методі, відомі компанії: «Markbiz Nigeria» (Нігерія), «Cole Mills Limited» (США), ОАО «Геотрон» (Росія), «TOBIAS Associates» (США).

Висновок

Систематизовано та проаналізовано сучасні методи та засоби вимірювання густини нафтопродуктів, виявлено їхні переваги та недоліки.

Розроблено нову вдосконалену класифікацію методів і засобів вимірювання густини нафтопродуктів, в основу якої покладено чотири основні класифікаційні ознаки, а саме: за методом; за різновидом реалізації методу; за засобами, що реалізують метод; за особливістю конструкції.

Обґрунтовано вибір найперспективнішого та найточнішого методу для контролю якості нафтопродуктів у заданих умовах. Таким методом є ультразвуковий, який, незважаючи на незначні недоліки (необхідність перед вимірюванням густини викачування повітря із пульп, оскільки повітряні бульбашки значно впливають на поглинання ультразвуку; ультразвукові густиноміри є досить вартісними), має безліч переваг над іншими, а саме: безінертність та безконтактність вимірювання; відсутність рухомих частин у потоці, відсутність втрат тиску в трубопроводах; можливість їхнього застосування для вимірювання густини забруднених і агресивних середовищ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бензини автомобільні підвищеної якості. Технічні умови : ДСТУ 4839: 2007. – [Чинний з 2008-01-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2007. – 14 с.
2. Євро-5 — екологічний стандарт, що регулює вміст шкідливих речовин в вихлопних газах [Електронний ресурс] / Режим доступу : <https://ru.wikipedia.org/wiki/Євро-5>. – Назва з екрану.
3. Энергопроматоматика. – Каталог статей. Научные статьи и публикации [Електронний ресурс] / Режим доступу : <http://kipia.ru/catalog/izmeritelnye-pribory/izmerenie-urovnya/poplavkovye-urovnmery/pdu-poplavkovye-datchiki/> – Назва з екрану.
4. Зайцев Г. В. Теория автоматического управления и регулирования [2-е изд., перераб. и доп.] / В. Г. Зайцев. – К. : Вища шк. Головное изд-во, 1989. – 431 с.
5. ТОВ «Слот». Каталог продукції. Новини [Електронний ресурс] / Режим доступу : <http://www.slot.if.ua/news/5/> – Назва з екрану.
6. Подлесный Н. И. Элементы и системы автоматического управления и контроля : учебник [3-е изд., перераб. и доп.] / Н. И. Подлесный, В. Г. Рубанов, – К. : Вища шк., 1991. – 461 с.
7. Група компаній «АПЛИСЕНС». – Каталог продукції. Виробництво [Електронний ресурс] / Режим доступу : <http://aplisens.com.ua/prod/42> – Назва з екрану.
8. Белов А. В. Самоучитель по микропроцессорной технике / А. В. Белов. – СПб. : Наука и Техника, 2003. – 224 с.
9. Emerson. Process Management. – Каталог продукції. Новини [Електронний ресурс]. Режим доступу : http://www.vsp.com.ua/mobrey/systems_2/7812/ – Назва з екрану.
10. Цюцюра В. Д. Метрологія та основи вимірювання. Навч. посібник / В. Д. Цюцюра, С. В. Цюцюра, – К. : Знання. – Прес, 2003. – 180 с.
11. Белов А. В. Создаем устройства на микроконтроллерах / А. В. Белов. – СПб. : Наука и Техника, 2007. – 304 с.
12. Клепач М. М. Математичне та програмне забезпечення для визначення якісних показників нафтопродуктів за їх фізико-механічними параметрами / М. М. Клепач // Матеріали І міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів «АКІТ-2014». – Київ, НТУУ «КПІ», 2014. – С. 113 – 115.
13. Коновалов Г. Ф. Радио-автоматика / Г. Ф. Коновалов. – М. : Вища школа, 1990. – 355 с.
14. КСК – Автоматизація. – Каталог продукції. Виробництво [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://kck2011.ub.ua/ua/goods/view/11246/all/ultrazvukoviy-3-promeneviy-vitratomir-ufm-3030/> – Назва з екрану.
15. Д. Сю Современная теория автоматического управления и ее применение / Д. Сю, А. Мейер ; пер. с англ. под ред. д-ра техн. наук проф. Ю. И. Топчиева. – М. : Машиностроение, 1972. – 544 с.
16. Пат. 2227320 Российская Федерация, МПК G 06 F 17/12, G 01 N 33/22. Способ измерений показателей качества нефтепродуктов / Скворцов Б. В., Жиганов И. Ю., Синников С. Г., Васильев И. Р.; заявитель и патентообладатель Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С. П. Королева. – № 2002100538/09 ; заявл. 08.01.2002 ; опубл. 27.03.2004, Бюл. № 11.
17. Самофалов К. Г. Микропроцессоры / К. Г. Самофалов, О. В. Виктор, А. К. Кузьяк. – К. : Техніка, 1986. – 278 с.
18. Локазюк В. М. Мікропроцесори та мікро ЕОМ у виробничих системах : посібник / В. М. Локазюк. – К. : Видавничий центр «Академія», 2002. – 368 с.
19. Папушин Ю. Л. Основи автоматизації гірничого виробництва. / Ю. Л. Папушин, В. С. Білецький. – Донецьк : Східний видавничий дім, 2007. – 168 с. – ISBN 978-966-317-004-6.
20. Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп, – М. : Лаборатория базовых знаний, 2002. – 822 с.

Білинський Йосип Йосипович – д. т. н., професор кафедри електроніки та наносистем.

Огородник Костянтин Володимирович – к. т. н., доцент кафедри електроніки та наносистем.

Яремішена Наталія Андріївна – аспірантка кафедри електроніки та наносистем.

Вінницький національний технічний університет.