

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

О.В. Заболотний, О.В. Світличний

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ВЕЛИЧИН.
КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ ТВЕРДИХ І РІДИННИХ РЕЧОВИН**

Частина 2



Навчальний посібник до курсового та дипломного проектування

Харків «ХАІ» 2008

УДК 622.276.8 : 681.54

Заболотний О.В. Методи та засоби вимірювання фізико-хімічних величин. Контроль якості твердих і рідинних речовин: навч. посібник до курсового та дипломного проектування / О.В. Заболотний, О.В. Світличний. – Х.: Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2008. – Ч. 2. – 81 с.

Розглянуто особливості технологічних процесів підготування нафти та твердих матеріалів, описано засоби вимірювань та контролю їхніх загальнотехнологічних параметрів.

Приділено увагу впливу неінформативних параметрів на точність вимірювання основних параметрів і способів зменшення похибки їх визначення. Наведено конкретні технічні рішення, методики розрахунків і способи метрологічної атестації.

Для студентів спеціальностей «Метрологія та вимірювальна техніка», «Метрологія, стандартизація, сертифікація».

Іл. 31. Табл. 4. Бібліогр.: 16 назв

Р е ц е н з е н т и: лауреат Державної премії України,
д-р техн. наук, проф. Л.А. Назаренко,
д-р техн. наук, проф. О.С. Куценко

© Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», 2008 р.

1 ПРИНЦИПИ ВИМІРЮВАННЯ ГУСТИНИ НАФТИ

Контроль густини є необхідним у багатьох процесах збирання, підготування та транспортування нафти. Густина – один з основних параметрів для розрахунку маси-брутто на вузлах обліку нафти.

У лабораторних умовах густина нафти визначається за допомогою пікнометрів і ареометрів. Результати вимірювання наводять для температури 20 °С:

$$\rho_{20} = \rho_t + \beta_t(t - 20),$$

де ρ_t – густина нафти за температури випробування t ; β_t – коефіцієнт (температурна поправка). Значення β_t можна обчислити за виразом $\beta_t = 0,001828 - 0,001320 \rho_t$.

Густина нафти також визначається за допомогою ареометрів. Для зменшення похибок, зумовлених випаровуванням легко летючих компонентів нафти, перед вимірюванням її густини простір герметичної скляної ємності попередньо насичують парами досліджуваної нафти, потім заповнюють до певного рівня ємність з нафтою і, частково дренуючи пари, що знаходяться у ємності, досягають винирювання ареометра, фіксуючи при цьому значення густини досліджуваної нафти.

1.1 Вібраційні вимірники густини

Високі вимоги до точності вимірювання густини нафти у нафтопроводах, до надійності та простоти апаратурного оформлення привели до того, що з усієї різноманітності принципів вимірювання густини у потокових вимірниках густини нафти застосовують лише вібраційний, ультразвуковий та радіоізотопний.

Найбільше розповсюдження отримав вібраційний принцип, який завдяки використанню частотного способу вимірювання дозволяє досягти більш високої точності порівняно з амплітудними принципами, забезпечити більш високу стійкість апаратури до перешкод і передавання інформації від виходу первинного перетворювача до входу підсилювально-перетворювальної апаратури з мінімальними втратами; найбільш точно та просто здійснити перетворення часового інтервалу у код.

Вібраційні вимірники густини розподіляються на електромагнітні (ендовібратори) й електромеханічні з розподіленими параметрами (камертонні, язичкові, пластинчасті, струнні, консольні та ін.) та з

зосередженими параметрами (язичкові, пластинчасті, струнні, крутильні) [1]. У основу роботи вібраційних вимірників густини, чутливий елемент яких здійснює коливальні рухи у досліджуваному середовищі, закладено зв'язок між густиною середовища та власною частотою коливань чутливого елемента:

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + h \frac{\partial x}{\partial t} + \omega_0^2 x = F(t),$$

де x – результуюче переміщення чутливого елемента; $h = P/m$ – коефіцієнт затухання коливань; P – коефіцієнт, що характеризує втрати енергії у системі; m – маса коливальної системи; ω_0 – власна частота коливань системи, $\omega_0 = \sqrt{K/m}$; K – жорсткість системи; $F(t)$ – зведена сила збудження коливань, яка використовується в якості чутливого елемента (датчика).

Вібраційні вимірники густини виготовляють у проточному виконанні та для занурення у досліджувану рідину.

У проточному вимірнику густини «Денситон ДД9Ф» фірми ММГ-АМ (Угорщина) реалізовано диференціальний метод вимірювання густини, оснований на порівнянні частоти коливань вимірювального циліндра, заповненого досліджуваною рідиною, та частоти коливань компенсаційного циліндра (рис. 1.1).

Як вібрувальний елемент у вимірювальному каналі використано порожнистий циліндр 2, через який протікає досліджувана рідина. Коливальні рухи, що збуджуються у циліндрі за допомогою електромагнітної головки 1, передаються конкретній масі досліджуваної рідини. Індикація частоти коливань циліндра здійснюється приймальною головкою 3, яка є котушкою індуктивності та з'єднаним з нею послідовно омичним опором. У процесі вимірювань між частотою коливань, що збуджується у циліндрі, та частотою коливань, що фіксується приймальною головкою, виникає зсув фаз. Цей зсув фаз фіксується відповідною схемою 5. За допомогою цієї схеми та підсилювача 4 здійснюється також і компенсація фазового зсуву, що виникає.

З метою компенсації змін тиску та температури рідини у приладі використані порожнистий циліндр компенсації 8 з сильфоном 11, заповненим гасом, і схема температурної компенсації (датчик температури 7, блок температурної корекції 6).

Циліндр компенсації збуджується електромагнітною головкою 9. На ці коливання реагує приймальна головка 10, з'єднана через схему зсуву фази 13 і підсилювач 12 зі збуджувальною головкою 9.

Частотні сигнали з вимірювальної схеми та схеми компенсації надходять у блок 14 формування різницевої частоти. Сигнал різницевої частоти подається у блок 15, де здійснюється температурна корекція різницевого частотного сигналу. У блоці 16 частотний сигнал перетворюється у напругу. Вимірник густини «Денситон ДД9Ф» може визначати густину рідини в діапазоні від 750 до 930 кг/м³ з похибкою $\pm 0,9$ кг/м³ при зміні тиску до 6,4 МПа, температури досліджуваної рідини від -3 до +60 °С і навколишнього середовища від -50 до +60 °С; в'язкості $(1,0...60) \cdot 10^{-6}$ м²/с та об'ємній витраті від $27 \cdot 10^{-7}$ до $500 \cdot 10^{-6}$ м³/с.

Вимірник густини має певні недоліки. У сильфоні компенсуючого циліндра відсутній зворотний зв'язок, тому залежності частоти від тиску для вимірювального циліндра та циліндра компенсації для різних значень густини будуть неоднаковими. Оскільки циліндр компенсації заповнено гасом, на результати вимірювань впливатиме в'язкість досліджуваної рідини. Зі збільшенням густини ця похибка буде рости.

З урахуванням цих недоліків було виготовлено та випробувано одноканальний вимірник густини, в конструкцію якого додано схему автоматичної корекції за тиском.

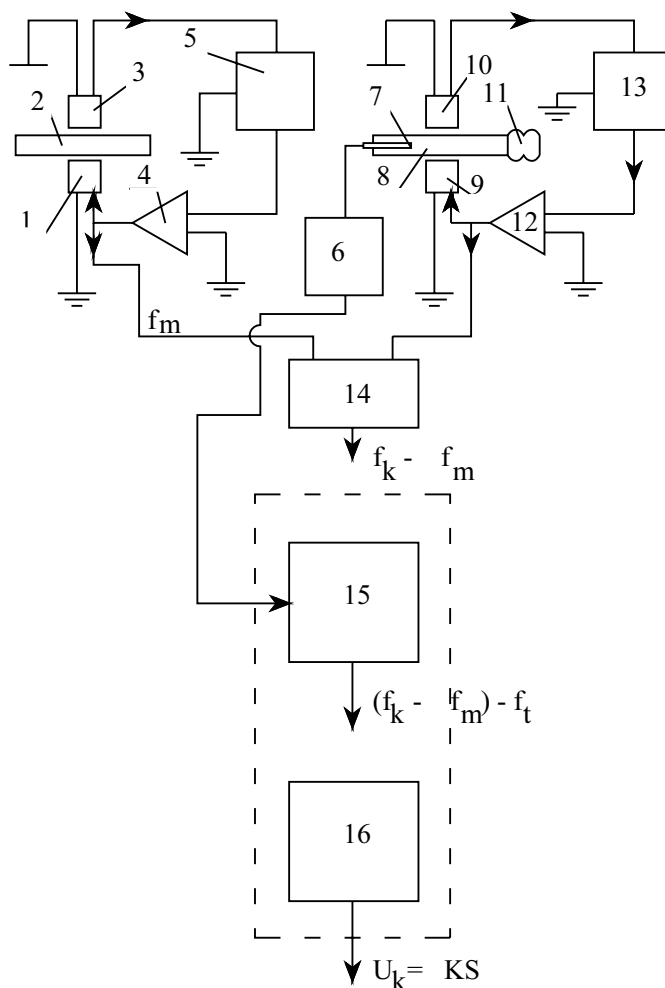


Рисунок 1.1 – Вимірник густини «Денситон ДД9Ф»

Вимірник густини американської фірми «Белл енд Ханівелл/СЕС» (рис. 1.2) складається з одної вібривальної трубки 9, по якій протікає досліджувана рідина, основної рами 11, з'єднаної з трубкою за допомогою конусів 4, противаг 5, датчиків відхилення 6, 8 елеткромагніта збудження 7, датчиків тиску та температури 10.

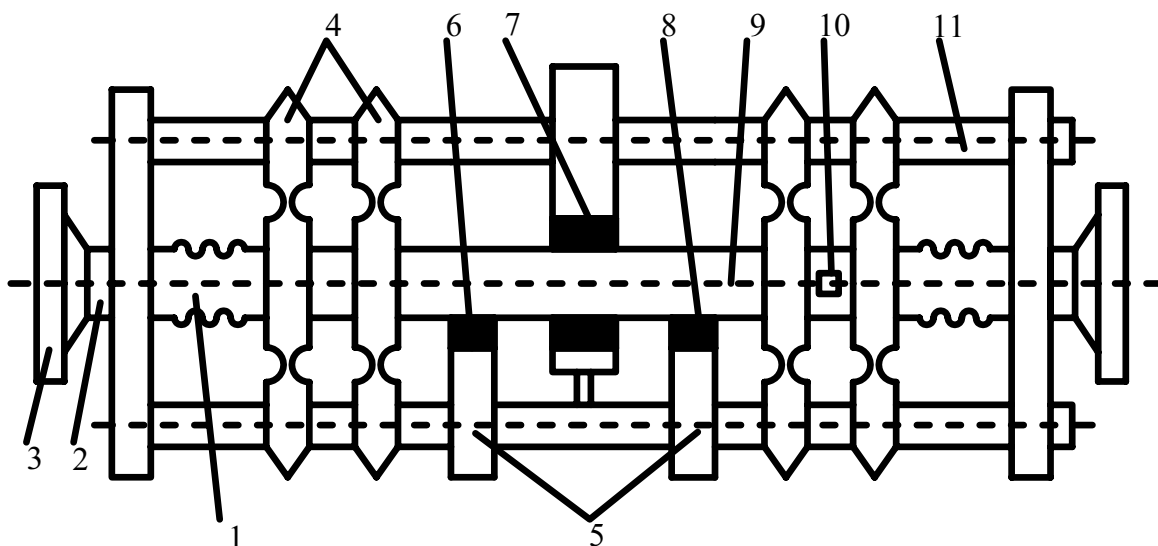


Рисунок 1.2 - Вимірник густини фірми «Белл енд Ханівелл/СЕС»

Трубка 9 через гофровані мембрани 1, кінцеву арматуру 2 і фланець 3 приєднана до трубопроводу. Трубка 9 з двома кронштейнами (кожен кронштейн складається з короткої трубки та двох пар конусів 4) і двома комплектами різноваг 5 утворює «вилку настроювання», яка резонує на певній частоті, пропорційній масі рідини у трубці 9. Вихідний частотний сигнал, що фіксується датчиками відхилення 6, 8, через підсилювач підтримки та фільтр подається на операційний підсилювач, який забезпечує отримання прямокутного імпульсу на вході лічильника. Лічильник вмикає «низький» лічильник, який приводить у дію вентиляну схему, та «високий» лічильник, що керується вентиляною схемою та призначений для зчитування імпульсів з кварцового годинника. Вихідний сигнал з «високого» лічильника подається на перетворювач дискретних сигналів у аналогові. У якості датчиків тиску та температури використані відповідно тензометричний датчик і термометр опору, виготовлені з фольги. Діапазон вимірювання густини складає 700...1500 кг/м³.

Датчик вібраційного вимірника густини японської фірми «Іокагава» (модель VD6) складається з корпусу 1 у формі U-подібної порожнистої трубки 2 (рис. 1.3), по якій протікає досліджувана рідина.

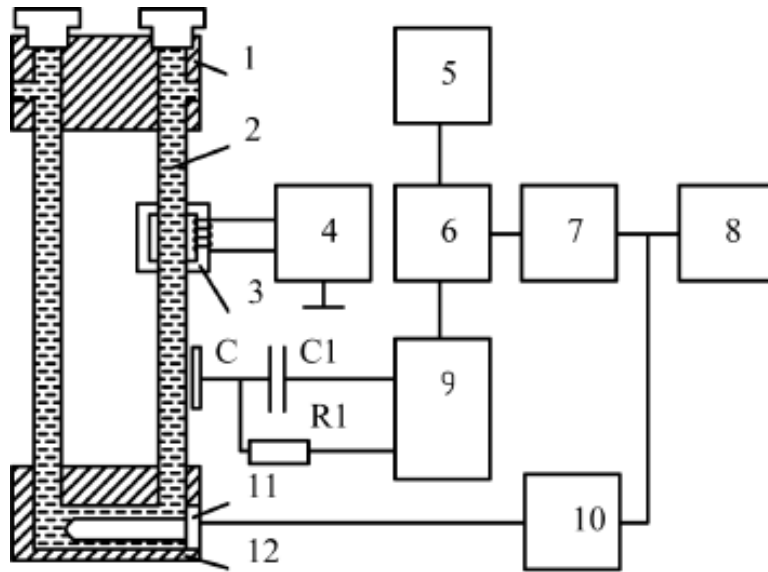


Рисунок 1.3 – Вібраційний вимірник густини фірми «Іокагава»

Співвідношення між частотою вільної поперечної вібрації порожнистої трубки та густиною ρ має таку форму:

$$f = \frac{C}{4l^2} \sqrt{\frac{E(D_1^2 + D_2^2)}{\rho_1 \left(1 + \frac{\rho}{\rho_1}\right) / \frac{D_2^2}{D_1^2 - D_2^2}}},$$

де D_1 і D_2 – зовнішній (7 мм) і внутрішній (6,7 мм) діаметри трубки; ρ_1 – густина матеріалу стінки трубки; C – константа; E – модуль Юнга; l – довжина трубки (164 мм).

У вимірнику густини вібратором слугує котушка індуктивності 3, з'єднана з генератором 4, або п'єзоелектричний перетворювач, що монтується на нижній поверхні перетинки 12. Коливання порожнистої трубки фіксуються конденсатором C , підсилюються у підсилювачі 9 і передаються у змішувач 6, де вони змішуються з коливаннями стандартного (зразкового) генератора 5. Сигнал різницевої частоти надходить у блок 7 для перетворення частоти у напругу та лінеаризації сигналу. Сигнал реєструється самописом 8. У схемі вимірника густини передбачено температурну компенсацію, яка складається з терморезистора 11 і перетворювача «частота – напруга» 10. Робота схеми температурної компенсації основана на підтриманні різниці між позитивним температурним коефіцієнтом трубки та від'ємним температурним коефіцієнтом рідини. Коефіцієнт

тиску дорівнює $2,7 \cdot 10^{-5}$ (г/см³)/МПа. Діапазон вимірювання – 500...
 ...1500 кг/м³, похибка – $\pm 0,2\%$, лінійність – 0,5% на всю шкалу.
 Похибка від впливу в'язкості складає $\pm 0,1\%$ при зміні в'язкості від 0 до 5,0 Па·с.

Проточний вимірник густини (рис. 1.4) складається з порожнистого
 циліндра 1 з досліджуваною рідиною, закріпленого в еліпсоподібній
 рамі 2 з вантажами 4.

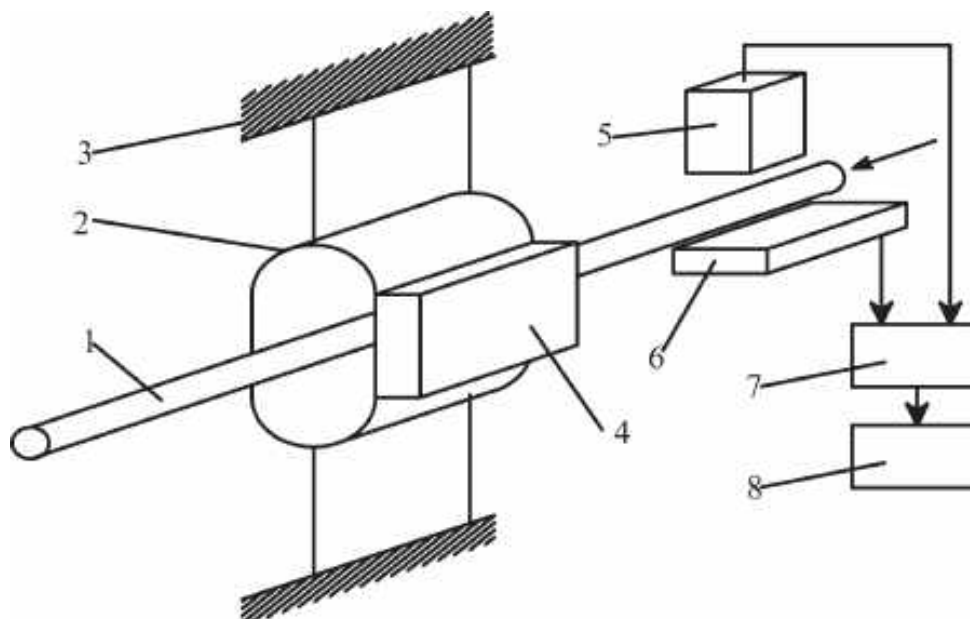


Рисунок 1.4 – Схема проточного вимірника густини

Еліпсоподібна рама закріплена у плоских пружинах 3. Електромагнітні перетворювачі 5, 6 по черзі виконують функції або збудника, або приймача коливань. Перемикання режимів роботи перетворювачів здійснюється у електронному блоці 7 за допомогою часового перемикального пристрою 8. У одному циклі коливання у циліндрі збуджуються по осі ординат без додавання вантажу, а в наступному – по осі абсцис (з доданою масою вантажів). Міра густини досліджуваної рідини, що не залежить від її температури, – це співвідношення квадратів частот коливань у двох взаємно перпендикулярних напрямках, тобто:

$$\frac{f_1^2}{f_2^2} = 1 + \frac{m_{\text{дод}}}{m_{\text{ж}} + m_0},$$

де m_0 – маса порожнистого циліндра; $m_{\text{ж}}$ – маса рідини; $m_{\text{дод}}$ – маса

вантажів, прикріплених до еліпсоподібної рами.

Відомо, що рух рідини по трубопроводу супроводжується збудженням акустичного шуму, основна частина якого знаходиться у діапазоні частот коливань до 50 кГц. Форма частотного спектра має форму експоненти, що зменшується. Рівень акустичного шуму лінійно пов'язаний зі швидкістю потоку. Зі збільшенням швидкості руху рідини збільшується потужність акустичних коливань і зменшується спектр у бік високих частот.

Поправку на відхилення густини $\Delta \rho$, зумовлену впливом швидкості звуку, визначають за формулою

$$\Delta \rho = \rho_{p,t} \left[1 + \frac{4,6 \cdot 10^{-6}}{1400 + \rho_{p,t}} \right] - \left[\frac{1}{v_c^2} + \frac{1}{v_a^2} \right],$$

де $\rho_{p,t}$ – густина за нормальної швидкості в умовах потоку; v_c – швидкість звуку при калібруванні ($v_c = 100 \dots 11,455 \rho_{p,t}$ при $\rho_{p,t} = 300 \dots \dots 1100 \text{ кг/м}^3$); v_a – швидкість розповсюдження звуку в рідині.

1.2 Засоби перевірки вимірників густини

Ефективним засобом для перевірки виявився металевий пікнометр, який є якісно відполірованою товстостінною (розрахованою на тиск до 30 МПа) циліндричною ємністю з конусоподібними звуженнями (місткість ємності – 500 см^3 , маса – 4,5 кг) і двома вентилями на вході та виході. Для запобігання розриву пікнометра при підвищенні температури (підвищення температури на $1 \text{ }^\circ\text{C}$ викликає збільшення тиску на 0,85 МПа) у ньому передбачене відривне кільце. Пікнометр розміщують у спеціальному футлярі з вимірником температури.

Перед проведенням вимірювань зважують порожній і заповнений дистильованою водою пікнометр, і за різницею мас визначають місткість пікнометра (так зване «водне число пікнометра»). Після заповнення пікнометра досліджуваною рідиною закривають вхідний і вихідний вентиля, пікнометр демонтують і зважують на еталонних вагах з похибкою $\pm 10 \text{ мг}$. Густина рідини визначається діленням маси пікнометра, заповненого досліджуваною рідиною, на його місткість. За допомогою пікнометра вдається визначити густину з похибкою $\pm 0,1 \dots \dots 0,15 \text{ кг/м}^3$. Пікнометр дозволяє визначити густину рідини в умовах експлуатації (тиск, температура, наявність сторонніх включень). Саме тому металевий пікнометр є основним елементом відомчої

перевірочної схеми для вібраційних проточних вимірників густини. Його застосовують для повірки в лабораторних умовах і умовах експлуатації.

На рис. 1.5, а зображено схему стаціонарної перевірочної лабораторної установки.

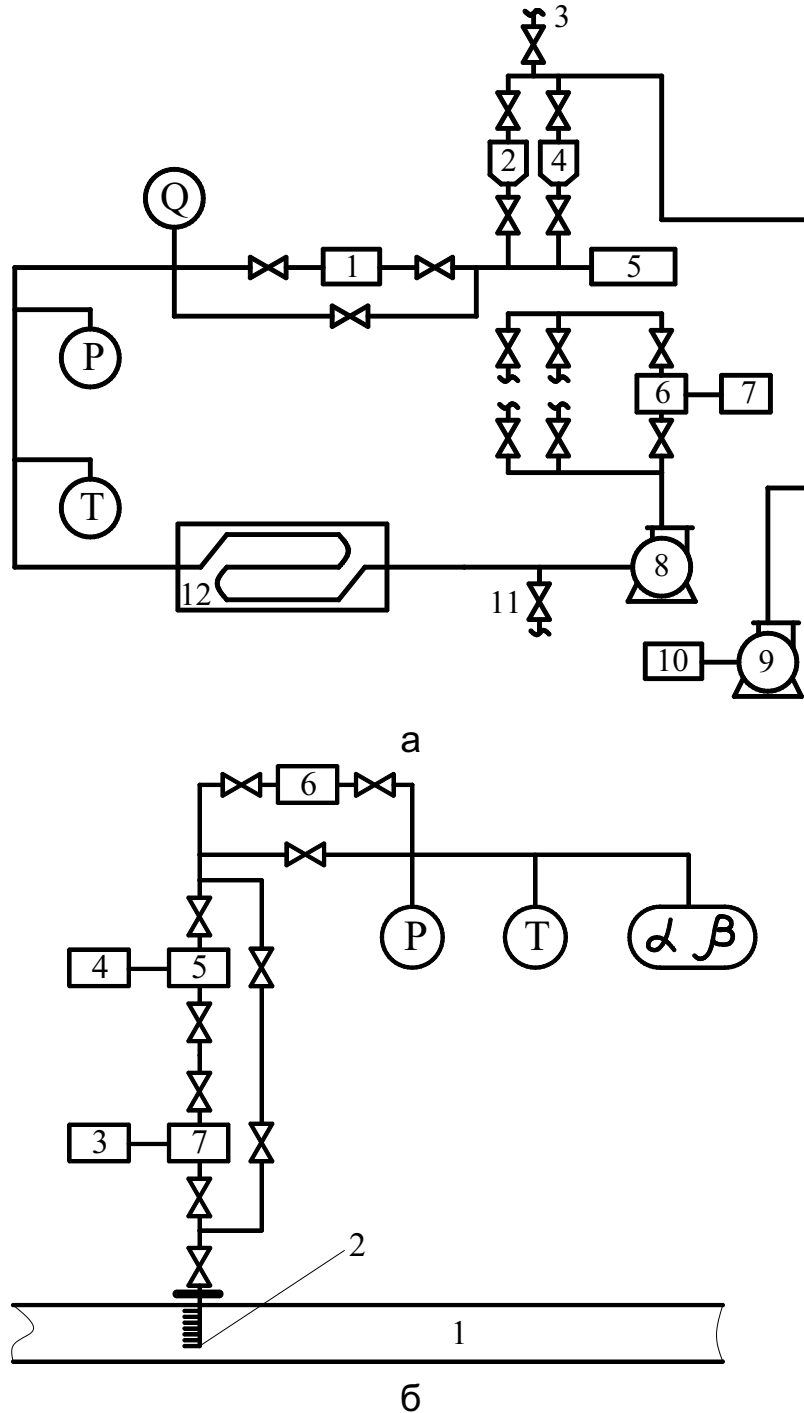


Рисунок 1.5 – Перевірочні установки для вимірників густини

Вона складається з термокамери 12 типу «Фейтрон» (Німеччина) з розміщеним у середині змійовиком, вимірника густини, що перевіряється (датчик 6 і вторинний прилад 7), металевого пікнометра 1, насоса 8, регулятора тиску 5 для створення необхідного тиску у гідравлічній схемі, прецизійних вимірників тиску, витрати та температури, ємностей 2, 4 для заповнення гідравлічної системи установки досліджуваною рідиною за допомогою насоса 9, з'єданого з ємністю 10. Рідина зливається через кран 11, а повітряні бульбашки виводяться через кран 3. Повірку вимірника густини здійснюють за відповідною методикою.

Показання повіреного за даною установкою вимірника густини перевіряють в умовах експлуатації за результатами вимірювання густини за допомогою металевого пікнометра з урахуванням поправок на стиснення та об'ємне термічне розширення матеріалу пікнометра.

Схему для повірки достовірності показань пікнометрів в умовах експлуатації зображено на рис. 1.5, б. Рідина з трубопроводу 1 через п'ятишаровий відбірник проб 2 надходить на два однакових датчики густини 5, 7 з вторинними приладами 3, 4.

Наявність двох одностипних атестованих вібраційних вимірників густини необхідна для оперативного контролю правильності їхньої роботи. При ввімкненні вимірників густини у роботу стежать за тим, щоб різниця сигналів на їхніх виходах не перевищувала 0,05% для вимірника густини «Солартрон» і 0,3% – для вимірника густини «Денситон». Вихідні сигнали з вимірників густини подаються на пристрій контролю та сигналізації різниці вихідних сигналів. При відхиленні показань вібраційних вимірників густини правильність їх роботи перевіряють за допомогою пікнометра б.

Якщо показання одного з вимірників густини відрізняються від значення густини, визначеної за допомогою пікнометра, вимірник потребує заміни або ремонту.

Для зведення густини, визначеної пікнометром, до умов трубопроводу, які визначають за допомогою прецизійних вимірників тиску та температури, обчислюють місткість пікнометра $V_{p,t}$ за цих умов:

$$V_{t,p} = V + \alpha t + \beta p,$$

де V – місткість пікнометра за температури 20 °С і тиску 0,1 МПа;
 t , p – температура і тиск рідини, що протікає по трубопроводу;

β – коефіцієнт стиснення матеріалу пікнометра; α – коефіцієнт об'ємного термічного розширення матеріалу пікнометра.

Значення $V_{p,t}$ використовують для обчислення густини нафти у трубопроводах:

$$\rho = \frac{(m_2 - m_1) \cdot (1 - \gamma \cdot D^{-1})}{V_{t,p}},$$

де m_2 – маса пікнометра, заповненого досліджуваною нафтою; m_1 – маса пікнометра без повітря; γ – густина повітря; D – густина матеріалу гир для балансування. Отримане значення густини порівнюють з показаннями вимірників густини і за необхідності їх коректують.

Реалізація пікнометричного способу вимірювання пов'язана з труднощами у забезпеченні метрологічних служб зразковими п'ятикілограмовими вагами. Тому проби нафти з трубопроводу краще відбирати не у пікнометр, а у товстостінну ємність високого тиску (ЄВТ). Відібрану нафту після охолодження ЄВТ до певної температури під тиском переливають у тонкостінний металевий титановий пікнометр, розрахований на тиск до 5,0 МПа. Для забезпечення відповідності проби нафти у ЄВТ і у пікнометрі ЄВТ обладнана змішувальним пристроєм. Даний спосіб дає можливість застосовувати менш дефіцитні ваги з меншим діапазоном вимірювання, що мають кращі метрологічні характеристики (похибка зважування ± 5 мг).

У якості зразкового приладу для повірки вимірників густини можна використовувати вимірник густини ППЛ-500, розроблений у «Гіпросхіднафті», у вигляді гідростатичних ваг, що мають підвішене на двох пружинах-підвісках коромисло, на одному кінці якого розміщено латунний циліндр, а на другому – дюралюмінієвий циліндр з показником рівноваги. Ваги встановлені у вертикальному циліндричному каналі. Досліджувана рідина під тиском надходить у циліндричний канал. Однофазність потоку у циліндричному каналі забезпечується спеціальним змішувальним механізмом, який складається з електромотора та крильчатки. При заповненні циліндричного каналу рідиною рівновага ваг порушується внаслідок зміни співвідношення виштовхувальних сил, що діють на латунний та дюралюмінієвий циліндри. Для повернення коромисла у рівновагу дюралюмінієвий циліндр повільно обертають за допомогою

обертального механізму, що містить електродвигун, редуктор і пристрій відліку. Одночасно при обертанні дюралюмінієвого циліндра фіксують початок і кінець процесу переміщення показчика рівноваги за допомогою ультразвукового інтерференційного датчика. Ультразвуковий датчик фіксує початок і кінець процесу переміщення показчика рівноваги, а механізм відліку – час, що витрачається на проходження показчиком рівноваги відстані між нефіксованим і фіксованим положеннями дюралюмінієвого циліндра. За часом визначають густину досліджуваної рідини. У вимірнику густини ППЛ-500 забезпечено термостатування досліджуваної рідини. За допомогою приладу ППЛ-500 можна вимірювати густину з похибкою 0,005... 0,01%.

При створенні зразкових вимірників густини можна застосовувати флотаційний спосіб вимірювання густини рідин, оснований на зв'язку густини досліджуваної рідини з параметром, при якому вдається надати поплавку, повністю зануреному у рідину, стану індиферентної рівноваги (поплавок не спливає і не тоне). Зазвичай такий рівноважний стан забезпечують поступовою зміною температури рідини. Температуру рідини, у яку занурено поплавок, визначають платиновим термометром опору. Кращий матеріал для виготовлення поплавка – плавлений кварц, що має дуже маленький коефіцієнт теплового розширення. За допомогою флотаційного методу можна вимірювати густину рідини з похибкою $\pm 0,0001\%$.

2 ПРИНЦИПИ ВИМІРЮВАННЯ В'ЯЗКОСТІ

2.1 Фізичні основи вимірювання в'язкості

Властивості кожної рідини можуть бути охарактеризовані цілим комплексом різних фізичних величин: значеннями густини, в'язкості, стискування, електропровідності, теплоємності, поверхневого натягу та ін. Більш за все рідини відрізняються одна від одної за в'язкістю, тому в'язкість дає найкраще уявлення про досліджувану рідину і повинна вважатись основною механічною характеристикою. Наприклад, густина рідин від найбільш легкої (рідкий водень) до найбільш важкої (рідка платина) відрізняються приблизно у 70 разів. В'язкості рідин від найбільш рухливих до найбільш в'язких відрізняються у мільярди разів.

Якщо брати до уваги не усі рідини взагалі, а розділити їх на групи (нафтопродукти, водні розчини та ін.), картина буде ще більш різною. Так, усі нафтопродукти потрапляють у діапазон густини 650...1000 кг/м³, тобто перевищують один одного за густиною не більше ніж у півтора раза. Щодо в'язкості, то в'язкість бітумів перевищує в'язкість петролейного ефіру у 10⁸ разів. В'язкість рідини істотно залежить від її складу. В'язкості різних сумішей води з гліцерином можуть відрізнятися у 1500 разів (густина ж змінюється у 1,26 раза). Домішка одного відсотка бензину у машинному мастилі знижує його в'язкість на 15%, у той час як густина такого розчину змінюється неістотно.

Значна залежність в'язкості рідин від їхнього складу дозволяє легко контролювати технологічний процес багатьох хімічних виробництв. Удосконалення принципів вимірювання даного параметра привело до появи нових принципів вимірювання концентрації розчинів, оснований на значній зміні в'язкості залежно від їх концентрації. Крім того, в'язкість може бути одним з найчутливіших показників температури, бо зміна температури рідини на один градус може привести до зміни в'язкості цієї рідини на 30%.

Явище внутрішнього тертя у рідині було зв'язане Ньютоном з її в'язкістю відомою формулою

$$\tau = \eta \frac{\partial v}{\partial R},$$

де τ – напруга внутрішнього тертя; $\partial v / \partial R$ – градієнт швидкості уздовж радіуса труби, тобто приріст швидкості на одиницю довжини нормалі; η – коефіцієнт, що характеризує дотичне зусилля на одиницю площі, прикладене до шарів рідини, які знаходяться один від одного на відстані, що дорівнює одиниці довжини за одиничної різниці швидкостей між ними.

Внутрішнє тертя, яке характеризується величиною η , німецький вчений М. Якоб запропонував називати динамічною в'язкістю. Уперше вираз для динамічної в'язкості було отримано лікарем Пуазейлем у 1842 році при вивченні процесів циркуляції крові у судинах. Провівши серію дослідів з капілярами, з'єднаними з кулеподібним резервуаром, через які під дією стисненого повітря пропускався певний об'єм рідини, визначений відмітками зверху та знизу резервуара, Пуазейль зробив такі висновки:

- кількість рідини, що витікає за одиницю часу, пропорційна тиску за умови, що довжина трубки перевищує певний мінімум, що зростає зі збільшенням радіуса;

- кількість рідини, що витікає за одиницю часу, є зворотно пропорційною довжині трубки і прямо пропорційною четвертому степеню радіуса.

Формулу Пуазейля записують так:

$$\eta = \frac{\pi \cdot P \cdot r^2 \cdot \tau}{8 \cdot V \cdot L},$$

де η – коефіцієнт внутрішнього тертя (динамічна в'язкість); P – тиск, за якого витікає рідина; τ – час витікання рідини в об'ємі V ; L – довжина капіляра; r – радіус капіляра.

Одиницею динамічної в'язкості є сила, необхідна для підтримання різниці швидкостей 1 м/с між двома паралельними шарами рідини площею 1 м², які знаходяться один від одного на відстані 1 м, тобто одиницею вимірювання динамічної в'язкості у системі СІ є Н·с/м², або Па·с. Величина, зворотна до динамічної в'язкості, називається текучістю і позначається T .

Широке розповсюдження отримав коефіцієнт кінематичної в'язкості, що являє собою відношення коефіцієнта динамічної в'язкості η до густини рідини для такої ж температури:

$$\nu = \eta / \rho.$$

У фізичній системі одиниць широко застосовується одиниця кінематичної в'язкості Стокс – [Ст] ($\text{см}^2/\text{с}$).

2.2 Класифікація принципів вимірювання в'язкості

Принципи вимірювання в'язкості можна розділити на дві великі групи: такі, що дають результат вимірювання в умовних одиницях, та абсолютні, які дозволяють виразити в'язкість у одиницях довжини, маси та часу. Спочатку з'явилися прилади для забезпечення принципів вимірювання першої групи, однак зараз вони застосовуються рідко. Головна причина, чому ці прилади ще виготовляють, – простота їхньої побудови та застосування. Однак вони придатні лише для грубих порівняльних вимірювань.

Принципи вимірювання в'язкості, що дозволяють виразити результат вимірювання у трьох основних одиницях, базуються на розв'язаних задачах гідромеханіки про протікання в'язкої рідини, яка обмежена твердими стінками. Ці принципи, у свою чергу, можуть бути розділені на дві підгрупи: для приладів з протіканням рідини у сталому та несталому режимах.

До першої підгрупи належать:

- капілярний принцип (протікання рідини у круглій трубі);
- ротаційний принцип (протікання рідини між двома співвісними циліндрами, конусами або сферами, що обертаються);
- принцип падаючої кулі (рух кулі у рідині);
- принцип співвісних циліндрів, що переміщуються один відносно другого уздовж осі;
- принцип паралельних нерухомих або рухомих площин.

Принципи, основані на теорії несталого протікання рідини, зводяться до вимірювань параметрів коливальних процесів. Використовують закони крутильних коливань циліндра або диска у рідині, крутильних коливань порожнистої сфери, заповненої рідиною, коливань кулі у рідині, ультразвукових коливань пластини у рідині.

Найбільше розповсюдження отримали перші три принципи, а особливо – капілярний. З принципів, основаних на теорії несталого режиму протікання рідини, найбільш перспективним є ультразвуковий.

2.3 Капілярний принцип вимірювання в'язкості

Теоретично найбільш опрацьованим і експериментально дослідженим принципом вимірювання в'язкості є капілярний. У 1840

році Пуазейль опублікував результати експериментального дослідження протікання води у тонких капілярних трубках. Йому вдалося визначити залежність між кількістю води, що протікає за одиницю часу Q (витратою), різницею тисків на кінцях капіляра P , довжиною трубки L та її діаметром d . Ця залежність, називається законом Пуазейля і має таку форму:

$$Q = K \frac{Pd^4}{L},$$

де K – деяка стала величина.

Далі цей закон був обґрунтований теоретично за таких припущень:

- усі частинки рідини рухаються зі швидкостями, паралельними осі трубки;

- частинки рідини, що прилягають до стінок, мають нульову швидкість;

- рух рідини є сталим;

- рідина не стискається;

- рідина є ньютонівською.

Типові конструкції капілярних віскозиметрів вільного протікання рідини, яке здійснюється лише під впливом власної ваги стовпа рідини, наведено на рис. 2.1 [2].

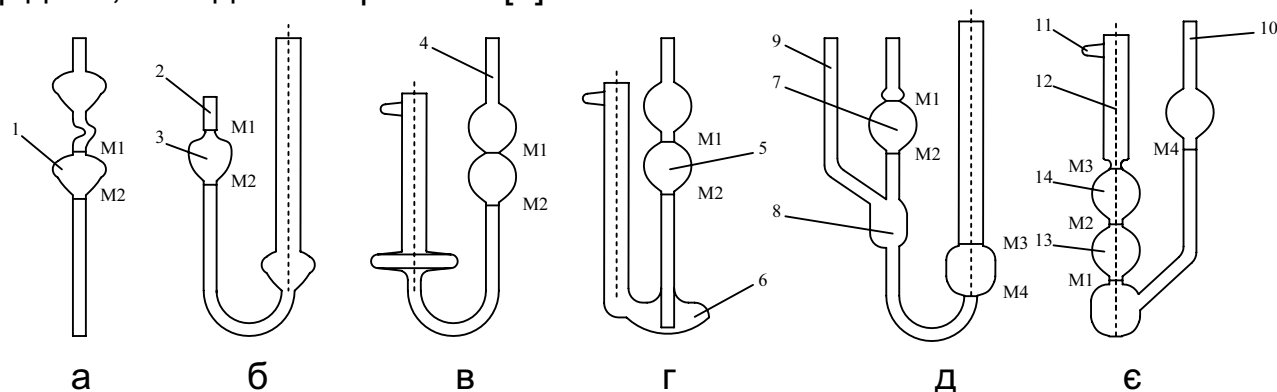


Рисунок 2.1 – Капілярні віскозиметри вільного протікання рідини

Найпростішим з них є піпетковий віскозиметр, утворений капіляром з розширенням 1 на одному з кінців (рис. 2.1, а). Такі віскозиметри зараз застосовують для визначення в'язкості розчинів целюлози. Для підтримання температури, необхідної для дослідів, піпеткові віскозиметри обладнують водяною «сорочкою», яка підімкнена до

термостата, або розміщують у водяній ванні. У дні ванни передбачено отвір для пропускання нижнього кінця віскозиметра.

Перед початком вимірювань нижній кінець приладу занурюють у досліджувану рідину, підтягують її вище розширення 1 і через деякий час, коли рідина матиме потрібну температуру, верхній кінець приладу сполучають з атмосферою.

Більш зручним для роботи з різними рідинами виявився віскозиметр, запропонований Оствальдом (рис. 2.1, б). У U-подібну трубку цього віскозиметра заливають строго регламентовану кількість рідини, бо від її об'єму залежить різниця рівнів рідини в обох колінах і, як наслідок, – швидкість руху. Перед вимірюванням рідину за допомогою гумової груші або насоса підтягують вище розширення 3, після чого коліно 2 сполучають з атмосферою і вимірюють час спорожнення розширення 3. У такому приладі простіше стабілізувати температуру, є можливість відтворення вимірів без повторного заливання рідини, його легше захищати від пилу. Збігання повторних вимірювань з тією ж самою порцією рідини свідчить про сталу температуру досліду та збереження чистоти досліджуваної рідини.

Також розповсюдженим є віскозиметр типу Пінкевича (рис. 2.1, в). У цьому приладі необхідну кількість рідини відмірюють за допомогою самого віскозиметра, перевертаючи його, занурюючи коліно 4 у рідину та підтягуючи її до позначки М2. Зараз цей прилад замінюють віскозиметром ВПЖ-2 (ГОСТ 10028) (рис. 2.1, г). Порівняно з попереднім цей прилад має менші похибки за рахунок нахилів при встановленні віскозиметра, бо осі верхнього 5 і нижнього 6 розширень збігаються.

Порівняно новим типом приладу є віскозиметр Уббелодє з «висячим рівнем» (рис. 2.1, д). У ньому під час вимірювання рідина протікає з резервуара 7 по капіляру і далі по стінках розширення 8, утворюючи біля нижнього кінця капіляра «висячий рівень», який створюється завдяки наявності трубки 9, що сполучає порожнину розширення 8 з атмосферою. Положення «висячого рівня» по висоті не залежить (у відомих межах) від кількості рідини у віскозиметрі. Тому в результат вимірювання не входять похибки, зумовлені неточним заповненням віскозиметра, і похибки, пов'язані зі зміною об'єму рідини від температури, завдяки чому ці прилади порівняно з іншими дають найбільш відтворювані результати вимірювань. Ці переваги пояснюють широке застосування подібних приладів усіма країнами.

Розглянуті вище віскозиметри є приладами для дослідження прозорих рідин. Якщо рідина навіть у тонкому шарі не є прозорою,

використовують віскозиметри «зворотної течії», у яких швидкість протікання визначається за часом заповнення чистої ємності, не змоченої рідиною, а не за часом спорожнення заповненого резервуара.

Одним з таких віскозиметрів є прилад типу ВНЖ (рис. 2.1, є). Його заповнюють аналогічно віскозиметрам Пінкевича та ВПЖ-2 – шляхом перевертання і занурення кінця трубки 10 у рідину. Підтягнувши рідину за допомогою груші або насоса, приєднаних до трубки 11 (кінець коліна 12 закривають пальцем), до позначки М4, прилад повертають у нормальний стан, витирають трубку 10 і приєднують до неї відрізок гумової трубки з краном або затискачем. Після цього віскозиметр встановлюють у термостат. Після встановлення потрібної температури відкривають трубку 10 і спостерігають за протіканням рідини. За допомогою двох секундомірів вимірюють час, необхідний для заповнення рідиною спочатку нижнього 13, а потім верхнього 14 резервуарів. Два вимірювальних резервуари цього віскозиметра передбачені для того, щоб при одному заповненні для більшої надійності провести два вимірювання. На відміну від приладів Пінкевича та ВПЖ-2, які дозволяють легко проводити багаторазові вимірювання, віскозиметри для непрозорих рідин перед повторним застосуванням необхідно мити та просушувати. Віскозиметри типу ВНЖ можна використовувати і для прозорих рідин, але і в цьому випадку їх слід промивати та просушувати, бо час заповнення сухих і змочених резервуарів є різним.

Для віскозиметрів вільного протікання рідини тиск, що діє на рідину, виражають через висоту стовпа рідини у приладі:

$$P = gH \cdot (\rho - e),$$

де e – густина повітря.

Підставивши цей вираз у формулу Пуазейля, маємо

$$\eta = \frac{\pi R^4 g H \rho}{8V(L + nR)} \left(1 - \frac{e}{\rho}\right) \tau - \frac{mV}{8\pi(L + nR)\tau}.$$

Розділивши обидві частини на ρ , одержимо

$$\frac{\eta}{\rho} = v = \frac{\pi R^4 g H}{8V(L + nR)} \left(1 - \frac{e}{\rho}\right) \tau - \frac{mV}{8\pi(L + nR)\tau}.$$

Коефіцієнти n і m характеризують значення поправки Куетта, суть якої можна пояснити так. Оскільки рідина затікає у капіляр з більш широкого резервуара, на певній відстані від капіляра вона рухається потоками, що сходяться з різними швидкостями. Ця різниця у швидкостях зумовлює додатковий опір протіканню рідини. Цей опір враховують додаванням до значення довжини капіляра деякої величини ΔL , пропорційної радіусу, тобто $\Delta L = nR$.

Незважаючи на велику кількість дослідів, до цього часу немає чітко зафіксованих значень для величин n і m . Більшість експериментаторів зупинились на значеннях $n = 1.14$ і $m = 1.12$. Дослідження Кеннона показали, що m не є константою, а залежить від так званого числа Рейнольдса Re , яке обчислюється так:

$$Re = (dv_{сер})/\nu,$$

де d – діаметр капіляра; $v_{сер}$ – середня швидкість протікання рідини, яка визначається як витрата, поділена на площу перерізу капіляра. Формула для m виглядає так:

$$m = 0.037(Re)^{0.5}.$$

Враховуючи деяку невизначеність величин n і m , виміри необхідно виконувати так, щоб вплив обох цих величин був мінімальним.

Величина e/ρ (відношення густини повітря до густини рідини) є малою порівняно з одиницею. Зазвичай зміною цього співвідношення, викликану коливаннями густини повітря і відмінністю густини різних рідин, нехтують.

Якщо усі сталі величини позначити літерами C і B , формула для динамічної в'язкості буде такою:

$$v = C\tau - \frac{B}{\tau}, \quad C = \frac{\pi R^4 g H}{8V(L + nR)} \left(1 - \frac{e}{\rho}\right), \quad B = \frac{mV}{8\pi(L + nR)}.$$

Величину C називають сталою віскозиметра, вона залежить від прискорення сили тяжіння g .

Як промисловий капілярний віскозиметр розглянемо конструкцію приладу VSM-2 фірми «Хокушин Електрик Уоркс» (Японія), показаного на рис. 2.2.

Потік рідини, який надходить у вхідний патрубок 1 і приймальну камеру 3, прокачується з постійною швидкістю шестеренною помпою 10 уздовж капілярної трубки 9 у вихідну камеру 8 і виводиться з віскозиметра по вихідному патрубку 11. Дифманометр 5 вимірює різницю тисків у камерах 4, відокремлених від приймальної і вихідної камер мембранами. Вимірювальний блок розміщено у нагрівальному блоці 2, обладнаному датчиками 6, 7 для контролю та регулювання температури.

Для таких віскозиметрів є справедливим вираз

$$\Delta p = a \eta v + b \rho v^2,$$

де Δp – перепад тиску; a , b – коефіцієнти, що характеризують геометрію гідравлічних опорів; η , ρ , v – в'язкість, густина та об'ємна швидкість досліджуваної рідини.

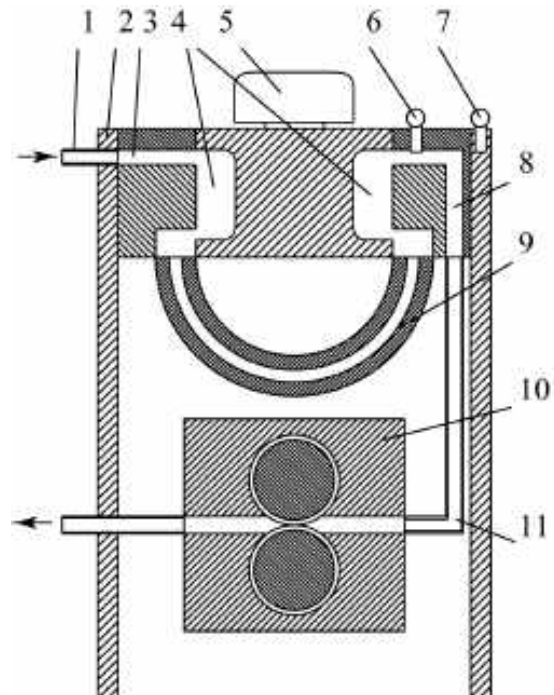


Рисунок 2.2 – Прилад VSM-2

2.4 Похибки капілярних віскозиметрів

Переважну більшість вимірів в'язкості зараз здійснюють за допомогою віскозиметрів вільного протікання рідини. Частими є випадки, коли стандартні віскозиметри виявляються непридатними для роботи і експериментатор змушений власноруч конструювати прилади для конкретних дослідів. У будь-якому разі значення похибок і причини, що до них призводять, повинні бути відомими.

Похибка від неточного знання поправки на кінетичну енергію. Коефіцієнт m , який визначає цю поправку, залежить від форми кінців капіляра. Стандартами та нормами різних країн з

деякими припущеннями m приймається як стала величина. Її значення може коливатись у діапазоні 0,3...0,9, тобто сама поправка на кінетичну енергію має похибку 50%. Відносна похибка вимірювання в'язкості

$$\varepsilon_m = \frac{B}{C\tau^2} = \frac{mV}{8\pi LC\tau^2}.$$

Англійський стандарт рекомендує такий експериментальний спосіб визначення поправки на кінетичну енергію: вимірюють час протікання на конкретному віскозиметрі двох рідин з в'язкостями, що відрізняються у 3 – 4 рази, а коефіцієнти C і B обчислюють за такими формулами:

$$C = \frac{v_2\tau_2 - v_1\tau_1}{\tau_2^2 - \tau_1^2},$$

$$B = \frac{\tau_1\tau_2(v_2\tau_1 - v_1\tau_2)}{\tau_2^2 - \tau_1^2},$$

де v_1 і v_2 – в'язкості двох рідин; τ_1 і τ_2 – час їх протікання.

Похибка від зміни атмосферного тиску. При перевірці та застосуванні віскозиметра густини повітря і рідини можуть бути різними і, якщо не враховувати зміну величини $1 - e/p$, виникне похибка вимірювання. Сталі віскозиметрів визначають на рідинах, зазвичай виготовлених з нафтопродуктів. Якщо віскозиметр використовують також для роботи з нафтопродуктами, то відмінність досліджуваної рідини від калібрувальної за густиною буде не більше 100 кг/м^3 . Зміна атмосферного тиску при повірці віскозиметра та при роботі з ним у діапазоні 720...780 мм рт. ст. призводить до такої зміни густини повітря, що зумовить додаткову похибку у 0,03%.

При визначенні в'язкості рідин, коли у колінах віскозиметра над досліджуваною рідиною знаходиться атмосферне повітря, дану похибку можна не враховувати. Однак коли у колінах віскозиметра знаходиться газ під тиском, густина стисненого газу може істотно відрізнитись від густини повітря, і похибка вимірювання буде помітною. Для корекції результатів вимірювання, необхідно отримане значення в'язкості помножити на дріб:

$$\frac{1 - \frac{e_1}{\rho_1}}{1 - \frac{e}{\rho}} = 1.0013 \left(1 - \frac{e_1}{\rho_1} \right),$$

де e_1 і ρ_1 – густини газу та рідини в умовах вимірювання; 1,0013 – коефіцієнт, що дорівнює $1/(1 - e/\rho)$; $e = 1,2 \text{ кг/м}^3$ і $\rho = 900 \text{ кг/м}^3$ – середні величини густини повітря та калібрувальної рідини, яку використовують для встановлення сталої віскозиметра.

Похибка від неправильного встановлення приладу. Більшість віскозиметрів установлюють так, щоб капіляр знаходився у вертикальному положенні. Його відхилення від вертикалі призводить до зменшення стовпа рідини H , а це у свою чергу – до збільшення часу протікання рідини. На рис. 2.3 зображено віскозиметр типу Пінкевича, де А – центр об'єму вимірювання; В – центр нижнього розширення. Точки А і В збігаються з поверхнями рідин у колінах віскозиметра; γ – кут між віссю капіляра та лінією АВ.

Припустимо, що прилад обернули на малий кут $\Delta\gamma$ навколо осі, що проходить перпендикулярно до площини креслення через точку А. Тоді центр поверхні рідини у лівому коліні переміститься по дузі BB_1 у точку B_1 . Радіус цієї дуги

$$R = \sqrt{H^2 + S^2}.$$

Різниця у рівнях рідини в обох колінах зміниться на ΔH :

$$\Delta H = R[\cos \gamma - \cos(\gamma + \Delta\gamma)].$$

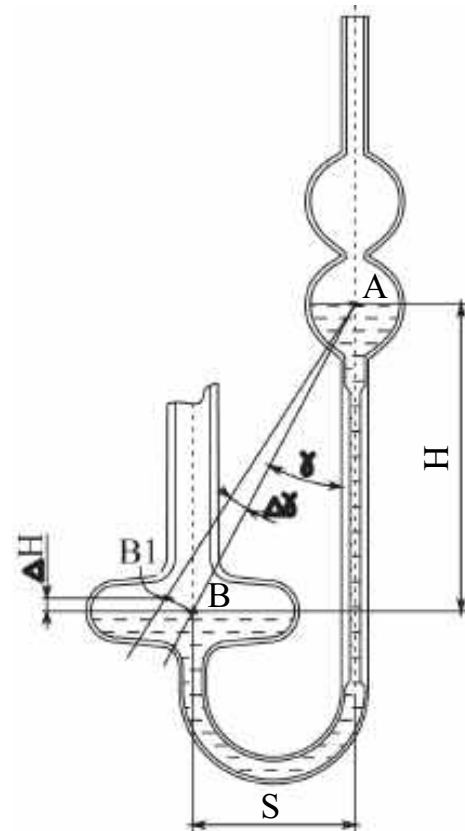


Рисунок 2.3 – Віскозиметр Пінкевича

Відносна похибка, зумовлена відхиленням приладу від вертикалі під час вимірювання на кут $\Delta\gamma$, буде

$$\varepsilon_{\gamma} = \frac{\Delta H}{H}; H = R \cos \gamma.$$

$\cos(\Delta\gamma)$ розкладемо у степеневий ряд. Через малість $\Delta\gamma$ вважатимемо

$$\cos(\Delta\gamma) = 1 - \frac{(\Delta\gamma)^2}{2}; \sin(\Delta\gamma) \approx \Delta\gamma.$$

Оскільки $\operatorname{tg} \gamma = S/H$, можемо отримати кінцевий результат:

$$\varepsilon_{\gamma} = \frac{(\Delta\gamma)^2}{2} + \frac{S}{H} \Delta\gamma.$$

Наведена формула є дуже зручною для оцінювання якості віскозиметрів, а також інших приладів, де використано принцип U-подібної трубки. Чим менше співвідношення S/H , тим кращим можна вважати прилад. У віскозиметрах з «висячим рівнем» (ВПЖ-1), а також у віскозиметрах типу ВПЖ-2 це співвідношення дорівнює нулеві. Досвід показує, що навіть за старанного встановлення віскозиметрів все ж таки можливе відхилення капіляра від вертикалі на $30'$, що призводить до похибки вимірювання, яка дорівнює $0,004\%$, а для приладів типу Пінкевича – $0,26\%$.

Похибка від неточного заповнення приладу. Усі віскозиметри, окрім віскозиметрів «висячого рівня», необхідно заповнювати регламентованим об'ємом рідини. Якщо у віскозиметри ВПЖ-2 і Пінкевича залити рідини більше, ніж потрібно, це викличе підвищення рівня рідини у нижньому резервуарі і призведе до збільшення часу її протікання. Прилад у цьому випадку покаже завищене значення в'язкості для досліджуваної рідини. Для зменшення цього ефекту потрібно виготовляти нижній резервуар віскозиметра з великим перерізом. Було встановлено, що при наповненні віскозиметрів типу Пінкевича або ВПЖ-2 нафтопродуктами з малою в'язкістю (порядку $30 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$) похибка при заповненні може складати $\pm 0,02 \text{ см}^3$. Для рідини з в'язкістю $15 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ ця похибка зростає до $\pm 0,04 \text{ см}^3$.

Зміна кількості рідини у приладі на величину ΔV призводить до

відхилення на ΔP висоти стовпа рідини. Відносна похибка вимірювання в'язкості така:

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta V}{FH},$$

де F – площа перерізу нижнього резервуара.

Наведена абсолютна величина $\Delta V = 0,04 \text{ см}^2$ для віскозиметрів ВПЖ-2 і типу Пінкевича відповідає похибкам вимірювання $\pm 0,012$ і $\pm 0,014$ відповідно.

Температурна похибка. Зміна температури під час проведення дослідів впливає на результат вимірювання в'язкості з таких причин:

- залежність в'язкості рідини від температури;
- зміна об'єму рідини, якою заповнено віскозиметр;
- зміна розмірів самого приладу.

Перша з цих причин призводить до найбільшої складової температурної похибки. Зміна в'язкостей рідини при зміні температури на 1°C складає до 30% і більше. Наприклад, для нафтопродуктів зміна в'язкості на один градус зміни температури тим більше, чим більше в'язкість нафтопродукту.

Для приблизних оцінок коливань в'язкості при зміні температури на 1°C пропонується така залежність:

$$K = 22.5 + 3.7 \lg v,$$

де v – в'язкість, $\text{м}^2/\text{с}$; K – зміна в'язкості нафтопродукту на один градус, %.

Кремнійорганічні рідини будь-якої в'язкості за температури 20°C мають однакову зміну в'язкості на один градус, яка дорівнює 2,1%, а слабкі водні розчини мінеральних солей – близько 2,5% на 1°C .

Друга складова температурної похибки, пов'язана з розширенням рідини, зумовлена тим, що, як правило, віскозиметр заповнюють при одній температурі, а вимірюють в'язкість – при іншій, яка може відрізнятися від початкової на $50\dots 80^\circ\text{C}$. Зміна об'єму рідини призводить до зниження або підвищення її рівня в одному коліні віскозиметра і, відповідно, до похибок, які зумовлені неточним заповненням приладу. Неважко показати, що початкова величина цієї похибки дорівнює

$$\varepsilon_t = \frac{V_0}{FH} \beta(t_2 - t_1),$$

де V_0 – об'єм рідини, залитої у віскозиметр; t_1 – температура наповнення віскозиметра; t_2 – температура вимірювання в'язкості; β – коефіцієнт розширення рідини.

У віскозиметрів з «висячим рівнем» ця похибка відсутня, бо коливання об'єму рідини у приладі не впливає на висоту діючого стовпа рідини.

Зміна розмірів віскозиметра під впливом температури (зміна діаметра капіляра, довжини, об'єму вимірювального резервуара, а також висоти стовпа рідини) внаслідок розширення скла призводить до зміни сталої віскозиметра.

Формула Пуазейля (без поправкових членів) для віскозиметрів, в яких рідина протікає під впливом сили тяжіння, має такий вид:

$$\nu = \frac{\pi g H R^4}{8 V L} \tau.$$

Якщо припустити, що скло віскозиметра розширюється рівномірно, то результат вимірювання в'язкості після зміни температури на $t_2 - t_1$ градусів буде таким:

$$\nu = \frac{\pi g H R^4}{8 V L} \tau [1 + \alpha(t_2 - t_1)],$$

де α – температурний коефіцієнт лінійного розширення скла.

Похибка від неповного спорожнення вимірювального резервуара. До моменту, коли рівень рідини у вимірювальному резервуарі підходить до нижньої позначки і експериментатор фіксує час його спорожнення, на його стінках лишається шар рідини більш товстий у нижній частині резервуару та більш тонкий у верхній частині. Об'єм рідини, що налипає на стінки, може складати для більшості віскозиметрів до 4% від об'єму резервуара. Кількість рідини, що залишається на стінках, залежить від в'язкості, часу протікання і форми самого резервуара. Через це подовжена форма резервуара є більш вигідною, ніж строго сферична.

Похибка від поверхневого натягу. Поверхневий натяг рідини змінює значення діючого напору H , під яким вона протікає. В усіх віскозиметрах, крім «висячого рівня», вплив поверхневого натягу в одному коліні частково компенсується натягом у іншому коліні. У віскозиметрів з «висячим рівнем» рівнодіюча поверхневого натягу в резервуарі, з якого витікає рідина, скерована завжди вверх і за рахунок цього відповідне зменшення діючого напору H може бути оцінене. Форма вільної поверхні «висячого рівня» залежить як від геометрії переходу капіляра у резервуар, так і від швидкості витікання рідини. Рівнодіюча натягу поверхні цього рівня може бути скерована як вверх, так і вниз.

Таким чином, у віскозиметрах «висячого рівня» не можна заздалегідь визначити навіть знак цієї похибки. Зменшення впливу поверхневих сил досягають конструюванням віскозиметрів з великим діючим напором H .

Відносну похибку у відсотках ε_s від нехтування впливом поверхневого натягу можна оцінити за допомогою формули

$$\varepsilon_s = \frac{200}{H} \left(\frac{\sigma}{g\rho} - \frac{\sigma'}{g\rho'} \right) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right),$$

де ρ – густина рідини, що застосовується для визначення сталої віскозиметра; σ – поверхневий натяг рідини, яка використовується для визначення сталої віскозиметра; ρ' – густина досліджуваної рідини; σ' – поверхневий натяг досліджуваної рідини; r_1 – середній діючий радіус вимірювального резервуара; r_2 – середній діючий радіус резервуара в іншому коліні.

Сталі капілярних віскозиметрів установлюють за допомогою нафтопродуктів.

Похибка вимірювання тривалості дослідів. Ця похибка має три складові: реакція спостерігача, яка може бути оцінена у 0,2 с; похибка секундоміра та візуальна похибка фіксування моменту проходження меніском рідини відміток M_1 і M_2 . Ця помилка може досягати лінійного значення 0,5 мм.

Для її зниження конструюють віскозиметри, що мають малий переріз трубки біля вимірювального резервуара (однак її діаметр не повинен бути менше діаметра капіляра, інакше при вимірюванні з'являються повітряні бульбашки, що різко знижують відтворюваність вимірювань).

При вимірюванні в'язкості проводять до десяти спостережень. Для зменшення відносної похибки необхідно обирати такі віскозиметри, щоб час вимірювання був більше 200 с.

2.5 Ротаційний принцип вимірювання в'язкості

Друге за популярністю місце отримали віскозиметри, за допомогою яких визначають в'язкість за відомими законами протікання рідини у кільцевому зазорі між співвісними циліндрами, що обертаються. З гідромеханіки відомий закон для сталої течії рідини

$$M = \frac{4\pi\eta L(\Omega - \omega)R^2r^2}{R^2 - r^2},$$

де M – момент, який діє на циліндри (внутрішній або зовнішній) на певному відрізку довжиною L ; R – радіус зовнішнього циліндра; r – радіус внутрішнього циліндра; Ω – кутова швидкість обертання зовнішнього циліндра; ω – кутова швидкість обертання внутрішнього циліндра.

Розглянемо дві конструкції віскозиметра з різними способами вимірювання моменту сил і виключення кінцевих ефектів. На рис. 2.4 зображено схему віскозиметра Воларовича РВ-7.

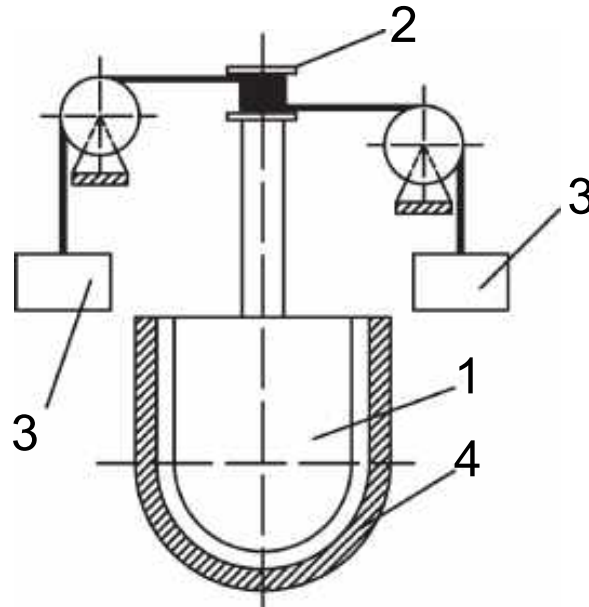


Рисунок 2.4 – Схема віскозиметра РВ-7

Внутрішній циліндр 1 приводиться в обертальний рух від шківів 2 і вантажів 3. Зовнішній циліндр 4 нерухомий. Досліджувана рідина знаходиться між циліндрами. За допомогою вантажів до внутрішнього циліндра прикладається певний обертальний момент за допомогою шківів 2 з відомим радіусом. Швидкість обертання внутрішнього циліндра визначають за допомогою секундоміра та стрілки, закріпленої на осі циліндра 1. Знизу циліндри переходять у півсфери. Радіуси півсфер дорівнюють радіусам циліндрів, центри обох півсфер збігаються. Момент M_1 , необхідний для обертання однієї півсфери по відношенню до іншої, дорівнює

$$M_1 = \frac{4\pi R^3 r^3 \omega \eta}{R^3 - r^3}.$$

В'язкість рідини за допомогою даного приладу визначають так:

$$\eta = \frac{M}{4\pi \left(\frac{L_0 R^2 r^2}{R^2 - r^2} + \frac{R^3 r^3}{R^3 - r^3} \right) \omega},$$

де L – діюча довжина циліндрів, яку визначають за змоченим слідом на внутрішньому циліндрі, для чого на ньому нанесено міліметрову шкалу.

Вважається, що вільна поверхня рідини мало порушує розподіл швидкостей, який існує на достатньо віддалених від поверхні горизонтах. Тому на вплив вільної поверхні рідини у даному приладі можна не звертати уваги.

За конструктивними особливостями наведений віскозиметр є приладом з нерухомим зовнішнім циліндром, у якому задається момент обертання та вимірюється швидкість на одному й тому ж циліндрі, з виключенням кінцевих ефектів шляхом уведення півсфер.

Серед способів вимірювання моментів сил поширені такі: за допомогою електромагнітних сил; за допомогою електростатичних сил; за допомогою тензодатчиків; за силою струму, яким живиться двигун, що обертає зовнішній циліндр.

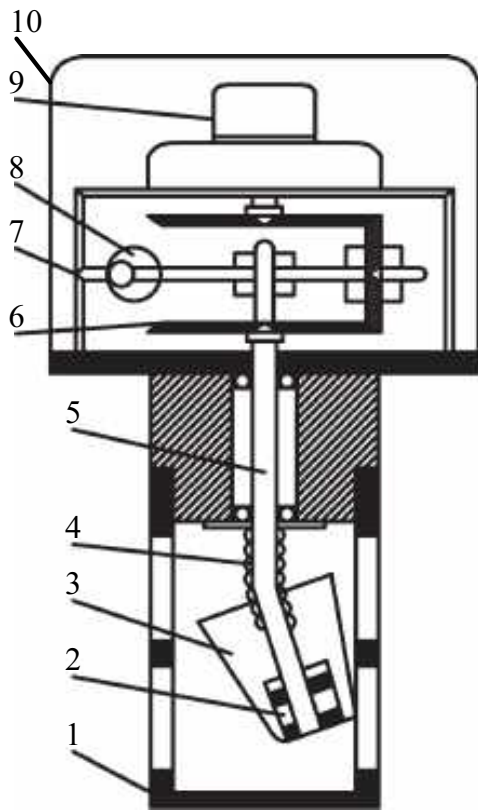


Рисунок 2.5 – Віскозиметр «Конвіметр»

Віскозиметри з співвісними циліндрами виготовляються для визначення в'язкості у широкому діапазоні: $1,5 \times 10^{-5} \dots 10^7$ кг/(м·с). Подібні прилади також придатні для дослідження неньютонівських рідин.

Проточний віскозиметр «Конвіметр» фінської фірми «Брабендер-межтехнік» показано на рис. 2.5.

Датчик віскозиметра складається з корпусу 1 з отворами, у якому знаходиться чутливий елемент 3, виготовлений у формі конічної ємності з отворами, та розміщеним усередині рухомими циліндром 2. Циліндр 2 обертається від електродвигуна 9, розміщеного у корпусі 10 і з'єднаного з циліндром редуктором 6 через гнучкий вал 5, захищений від впливу досліджуваного середовища металевим сильфоном 4. Показання віскозиметра передаються на реєстратор через вал 7, з'єднаний з шестерінчастим механізмом 8.

2.6 Похибки ротаційних віскозиметрів

Зупинимось на тих похибках вимірювання, які мають істотне значення для даного типу приладів.

Температурна похибка. Крім зміни в'язкості під впливом температури та пов'язаної з цим похибки від неточного визначення температури, у ротаційних віскозиметрах варто звертати увагу на розігрівання рідини, яка знаходиться між циліндрами. Енергія W , яка виділяється у рідині за одиницю часу, дорівнює (при $\omega = 0$)

$$W = M\Omega = \frac{4\pi\Omega^2 R^2 r^2 L \eta}{R^2 - r^2},$$

а об'єм рідини у зазорі –

$$V = \pi(R^2 - r^2) \cdot L.$$

Потужність, співвіднесена до одиниці об'єму, запишемо так:

$$p = \frac{W}{V} = \frac{4 R^2 r^2 \Omega^2 \eta}{(R^2 - r^2)^2}.$$

Якщо припустити, що половина енергії буде відводитись пристроями термостатування, а теплоємність рідини складає 2000 Дж/(кг·град), можна отримати вираз для грубого визначення можливого підвищення температури Δt за одиницю часу:

$$\Delta t = \frac{R^2 r^2 \Omega^2 \eta}{(R^2 - r^2)^2} \cdot 10^{-6}.$$

Тривалість процесу вимірювання визначається припустимим значенням температурної похибки.

Похибка від ексцентриситету циліндрів. Теоретично для цього принципу вимірювань передбачається чітке збігання осей внутрішнього та зовнішнього циліндрів. На практиці слід рахуватись з тим, що осі циліндрів можуть не збігатися.

Загальне вирішення задачі про протікання рідини у зазорі між неспіввісними циліндрами було здійснене М.Є. Жуковським. З його робіт випливає, що коли ексцентриситет циліндрів δ є малою величиною порівняно з зазором, то по відношенню до строго співвісних циліндрів діючий момент, а значить, і результат вимірювання в'язкості буде більшим на відносну величину

$$\varepsilon = 2 \left(\frac{\delta}{R - r} \right)^2.$$

Похибка від ексцентриситету може бути лише позитивною. Під час конструювання віскозиметрів з малими радіальними зазорами слід

приділяти особливу увагу зменшенню ексцентриситету циліндрів.

Похибки вимірювання моменту сил. Найпоширенішим способом вимірювання моментів сил є визначення моменту за кутом закручування сталевого дроту – підвісу. Для цього повинна бути відома жорсткість підвісу, тобто момент, необхідний для закручування дроту на певний кут. При вимірюванні в'язкості можна обчислити діючий на циліндр момент сил і потім в'язкість, визначивши кут, на який закрутився підвіс.

Існує два способи визначення жорсткості підвісів – динамічний і статичний. Динамічний спосіб визначення оснований на вимірюванні періоду крутильних коливань системи, яка складається з підвісу та геометрично правильного тіла обертання, момент інерції якого можна обчислити. Нехтуючи моментом інерції самого підвісу відносно його осі, жорсткість підвісу обчислюють так:

$$j = \frac{4\pi^2}{T_1^2} Y_1,$$

де j – жорсткість (момент, необхідний для закручування підвісу на один радіан); Y_1 – момент інерції підвішеного тіла; T_1 – період коливання системи.

Статичне визначення жорсткості підвісів здійснюють за допомогою пристрою, головна частина якого являє собою важіль, подібний до коромисла вагів. Один кінець підвісу закріплюють у важілі, а інший – у спеціальному патроні, який дозволяє закручувати підвіс на фіксований кут. Після закручування підвісу за допомогою вантажів важіль переводять у початкове (горизонтальне) положення. Момент обчислюють за відомими значеннями маси вантажу та довжини плеча важіля.

Похибка від сил тертя. У багатьох ротаційних віскозиметрах один з циліндрів обертається у підшипниках і сили тертя, які в них виникають, спотворюють результат визначення моменту сил. Тому бажано, щоб діючий на циліндри момент сил перевищував момент сил тертя у багато разів.

2.7 Принцип падаючої кулі

Для маленьких швидкостей руху кулі у в'язкому середовищі Стокс вивів залежність між силою F , яка діє на кулю, в'язкістю середовища і

швидкістю руху кулі v :

$$F = 6\pi\eta r_k v,$$

де r_k – радіус кулі.

Наведена формула отримана для кулі, що рухається у нескінченному в усіх напрямках середовищі.

Принцип Стокса застосовують здебільшого для випадку, коли куля рухається під впливом сили тяжіння. Сила F тоді може бути підрахована як різниця між силою ваги та архімедовою силою. Якщо у попередній формулі F замінити на $4/3\pi \cdot r_{ш} g(\rho_1 - \rho)$ (де ρ_1 – густина матеріалу кулі, ρ – густина рідини), отримаємо розрахункову формулу для в'язкості

$$\eta = \frac{2}{9} \cdot \frac{[\rho_1 - \rho] g r_{ш}}{v}.$$

Факсеном у свій час було виведено поправку, яка дає більш точне вирішення задачі падіння кулі у середовищі, коли співвідношення діаметра ємності D до діаметра кулі d є невеликим. Формула з поправкою виглядає так:

$$\eta = \frac{d^2 g(\rho_1 - \rho)}{18v} \left(1 - 2.104 \frac{d}{D} + 2.09 \frac{d^3}{D^3} - 0.95 \frac{d^5}{D^5} \right).$$

Принцип Стокса рекомендований для вимірювання в'язкості у діапазоні 10...1000 Н·с/м².

Однак для вимірювання за цим принципом потрібна досить велика кількість рідини. Крім того принцип є незручним через значну витрату часу на встановлення потрібної температури. Ці недоліки можна усунути, якщо використовувати ємності малого перерізу (у формі трубок) і попередньо проградувати прилад за рідиною з відомою в'язкістю. У цьому випадку потрібно виконувати дві вимоги: трубка повинна бути строго циліндричної форми, кулька повинна рухатись чітко уздовж осі трубки. У Німеччині випускають віскозиметр типу Гепплера, у якого діаметр трубки дорівнює 16 мм з похибкою не більше 10 мкм. Також передбачено нахил трубки, щоб замість важко здійсненого руху кульки уздовж її осі вона пересувалась стінкою

трубки. Прилад обладнаний набором кульок різного діаметра, що дозволяє визначати в'язкість рідин у діапазоні 0,001...1000 кг/м·с. Для визначення швидкості кульки на трубці перпендикулярно до її осі нанесено три кільцеві риски на відстані 50 мм одна від одної. Залежність між часом руху кульки τ і в'язкістю має таку форму:

$$\eta = K(\rho_1 - \rho)\tau,$$

де K – коефіцієнт, який для кожної кульки визначають експериментально.

Віскозиметр автоматичної дискретної дії з падаючою кулькою показано на рис. 2.6 (1, 2, 8 – котушки; 3 – бак з рідиною; 4 – кран; 5 – вторинний прилад; 6 – блок керування та центрвальний пристрій; 7 – електронний блок; 9 – мірча трубка; 10 – кулька; 11 – сітка).

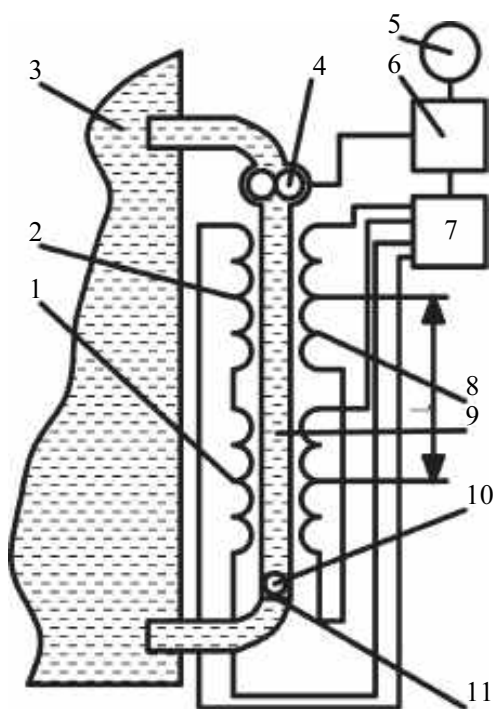


Рисунок 2.6 – Віскозиметр з падаючою кулькою

Досліджувана рідина з резервуара подається через кран, що періодично відчиняється, до мірчої трубки, яка обладнана сіткою та пристроєм центрування. Поток рідини кулька піднімається у верхнє положення. Після проходження заданого проміжку часу (5...15 хв) кран закривається і кулька починає падати у нерухомій рідині. При проходженні кульки уздовж котушок 2, 8 змінюється їх індуктивність. Зміна індуктивності котушок фіксується електронним блоком і вторинним приладом.

Мірою в'язкості є час, протягом якого кулька проходить відстань між котушками 1, 2. Блок керування призначено для періодичного закривання і відкривання крана. Діапазон вимірювання в'язкості – 1...10 Па·с. Основна похибка – 1% від максимального значення шкали.

2.8 Вібраційний принцип вимірювання в'язкості

Принцип дії вібраційних віскозиметрів оснований на зв'язку в'язкості та сили опору рідини, яка виникає внаслідок поздовжніх

коливань (гармонійних або імпульсних) попередньо збудженого від генератора тіла, розміщеного у досліджуваній рідині.

Сила опору рідини на одиницю поверхні дорівнює

$$F = -\sqrt{\rho\omega\mu} U_0 \cos(\omega t + \pi/4),$$

де U_0 – амплітуда коливальної швидкості; ω – частота коливань тіла, зануреного у рідину; ρ , μ – густина та в'язкість рідини; t – період коливання. Розрізняють низькочастотні ($f < 1$ кГц) вібраційні та високочастотні ультразвукові ($f = 10 \dots 1000$ кГц) віскозиметри.

Вібраційний віскозиметр японської фірми «Наметре» показано на рис. 2.7. Чутливий елемент приладу виготовлено у формі кульки діаметром 3 см з неіржавіючої сталі.

Кулька 1 під впливом коливального елемента 2, який вібрує з частотою 650 Гц, здійснює у досліджуваній рідині крутильні коливання з амплітудою 25 мкм. При коливанні кульки у рідині зменшується амплітуда коливань. Для підтримання заданої резонансної частоти кульці необхідно надати додаткової енергії, яка компенсує втрати енергії, зумовлені коливаннями у в'язкій рідині. Величину цієї енергії вимірюють детектором 4. Через коливальний елемент, тобто збудник 13 і вал збудника 3, кульці надають енергію до тих пір, поки не виникне резонанс.

Величина наданої енергії реєструється електронною схемою, яка утворена підсилювачем 12 з стабілізованим коефіцієнтом підсилення, попереднього підсилювача 11, схеми контролю точної амплітуди 10, підсилювача опорної амплітуди 5, фазообертального пристрою 9 з атенюатором, квадратичного підсилювача 6, операційного підсилювача 8 з фільтром нижніх частот, індикатора 7.

Квадрат величини додатково наданої енергії є пропорційним в'язкості рідини, помноженої на густину цієї рідини.

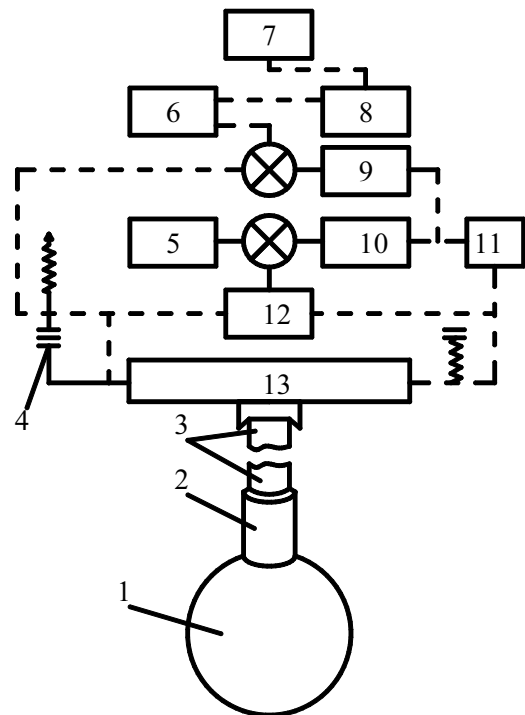


Рисунок 2.7 – Віскозиметр фірми «Наметре»

2.9 Державний первинний еталон в'язкості

Найбільш напрацьованим принципом вимірювання в'язкості є капілярний. Еталонні віскозиметри в усіх країнах представлені капілярними приладами.

Беручи до уваги обмежену точність абсолютних вимірювань в'язкості або їх істотної трудомісткості, технічний комітет ІСО/ТК-66 запропонував у 1958 р. визначати в'язкість рідин на еталонних приладах шляхом порівняння її з в'язкістю води при 20 °С. Друга пропозиція стосувалась значення в'язкості води при 20 °С. Було запропоноване значення $1,002 \cdot 10^{-3}$ Па·с (0,01002 пуаз) або $1,0038 \cdot 10^{-6}$ м²/с (0,010038 стокса), яке у межах похибок вимірювання підтвержене дослідним шляхом.

Зараз усі країни використовують значення в'язкості води, яке дорівнює $1,0038 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Крім води були запропоновані інші рідини, які б могли бути «реперними» точками при вимірюванні в'язкості. Так, за ОСТ 7872 встановлено для калібрування віскозиметрів вісім рідин: вода, формамід, етиленгліколь, 1, 2-пропіленгліколь, фенол, анілін, бензиловий спирт, хінолін. У Великобританії були запропоновані водні розчини сахарози різної концентрації, для яких устанавлювались певні значення в'язкості. Однак усі ці рідини були порівняно малов'язкими, а наведені у таблицях значення їхніх в'язкостей погано узгоджувались між собою. Навіть щодо води результати визначення її в'язкості різними авторами відрізняються на 3%.

Еталонні віскозиметри являють собою скляні капілярні прилади «висячого рівня», у яких рідина протікає під дією сили тяжіння [3].

Державний первинний еталон в'язкості складається з комплексу таких засобів вимірювання:

- набір з 30 скляних капілярних віскозиметрів «висячого рівня»;
- апаратура для стабілізації та вимірювання температури рідини в еталонних віскозиметрах (водяний термостат, який підтримує температуру 20 °С ± 0,05 °С, платинові та ртутні термометри);
- апаратура для вимірювання часу протікання рідини у віскозиметрах (електричні секундоміри з похибкою ходу 0,01% і похибкою відліку інтервалів часу 0,01 с).

Комплект еталонних віскозиметрів складається з десяти груп приладів – по три у кожній групі. Прилади, які складають одну групу, мають однакові розміри та однакові діапазони вимірювань.

У табл. 2.1 наведено номінальні розміри еталонних віскозиметрів.

Визначено точні значення сталих C для усіх 30 віскозиметрів за схемою, наведеною на рис. 2.8. На цій схемі прямокутниками позначені рідини, колами – віскозиметри. За в'язкістю води шляхом багаторазових вимірювань часу протікання були визначені сталі C шести приладів першої і другої груп (прилади 1, 2, 3 і 16, 17, 18) за формулою

$$C = \frac{\pi R^4 g H}{8 V L}.$$

Таблиця 2.1 – Номінальні параметри еталонних віскозиметрів

Номер групи	Діапазон вимірів $\times 10^4 \text{ м}^2/\text{с}$	Стала $C \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}^2$	Об'єм, см^3	Діаметр капіляра, мм	Найбільша поправка на кінетичну енергію, %
1	0.004...0.02	0.001	2	0.30	0.05
2	0.01...0.06	0.003	3	0.43	0.04
3	0.02...0.2	0.01	3	0.59	0.03
4	0.06...0.6	0.03	5	0.87	0.02
5	0.2...2	0.1	5	1.18	0.02
6	0.6...6	0.3	7	1.68	0.02
7	2...20	1	7	2.28	0.02
8	6...60	3	10	3.28	0.02
9	20...200	10	10	4.44	0.02
10	60...600	30	15	6.43	0.02

Далі за допомогою цих шести приладів виміряна в'язкість рідини $\nu=0.02 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ і встановлені сталі третьої групи (прилади 4, 5, 6). Аналогічно за в'язкістю рідини $\nu=0.06 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$, визначеної приладами другої і третьої груп, знайдені сталі віскозиметрів четвертої групи, і т.д. Як видно з рис. 2.9, для визначення сталих усіх віскозиметрів необхідно (крім води) мінімум вісім градувальних рідин з такими номінальними значеннями в'язкості: $2 \cdot 10^{-6}$, $6 \cdot 10^{-6}$, $20 \cdot 10^{-6}$, $60 \cdot 10^{-6}$, $200 \cdot 10^{-6}$, $600 \cdot 10^{-6}$, $2000 \cdot 10^{-6}$, $6000 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Номінальні значення сталих C утворюють геометричний ряд з множником прогресії $10^{1/2}$.

Зазвичай набори еталонних віскозиметрів складаються з меншої кількості приладів і утворюють тільки одну гілку схеми – ліву (прилади 1 – 15) або праву (прилади 16 – 30). Якщо набір приладів складається

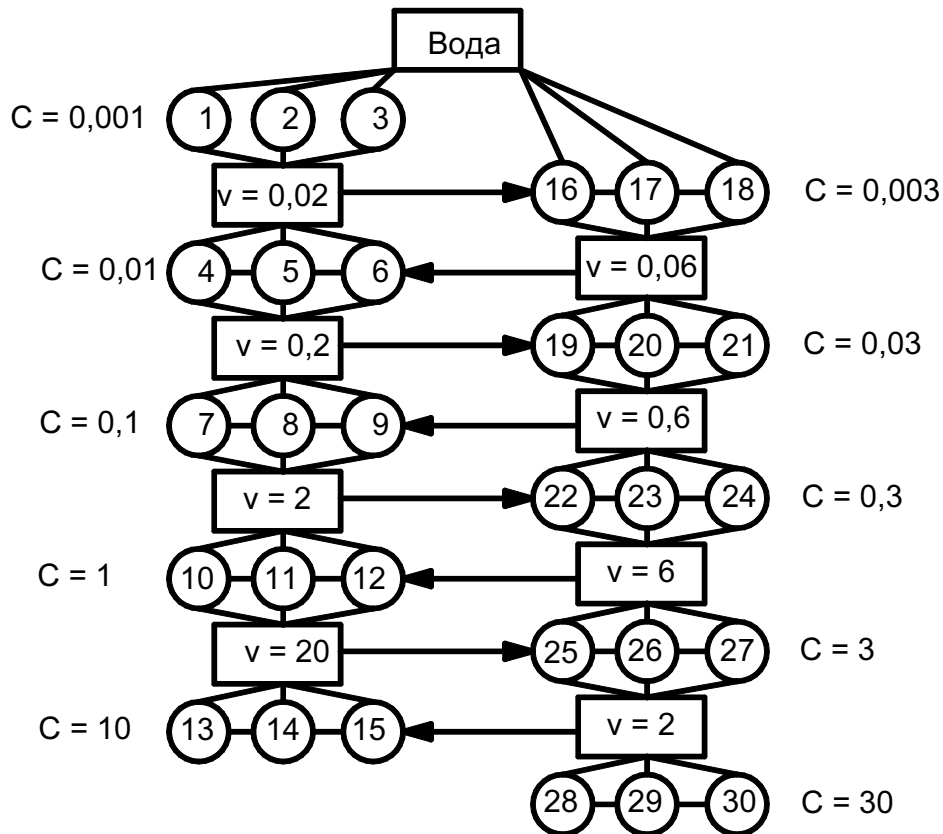


Рисунок 2.8 – Схема визначення сталих C еталонних віскозиметрів

тільки з однієї гілки з діапазонами вимірювань, які не перекриваються, важко помітити появу систематичної похибки. Наявність двох гілок приладів забезпечує більш високу надійність вимірів, бо існує можливість зіставляти результати вимірювань в'язкості, отримані на приладах правої або лівої гілки.

Первинний еталон в'язкості має такі основні характеристики:

- діапазон значень кінематичної в'язкості, які відворюються еталоном, складає $4 \cdot 10^{-7} \dots 6 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}$ (0.004...600 Ст);
- державний первинний еталон забезпечує відтворення одиниці з середнім квадратичним відхиленням S_0 , що не перевищує $3,5 \cdot 10^{-4}$ за невиключеної систематичної похибки не більше ніж $2 \cdot 10^{-3}$;
- державний первинний еталон застосовують для передавання розміру одиниці кінематичної в'язкості рідини вторинним еталонам шляхом порівняння за допомогою компаратора (рідин для градування).

Перевірочну схему для засобів вимірювання кінематичної в'язкості зображено на рис. 2.9.



Рисунок 2.9 – Перевірочна схема для засобів вимірювання в'язкості

3 ПРИНЦИПИ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ НАФТОПРОДУКТІВ І ТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ

Одним з головних технологічних параметрів, які визначають якість безлічі твердих матеріалів і рідин, що добуваються, переробляються або синтезуються різними галузями промисловості та сільського господарства, є вологість.

Вибір цього параметра для контролю та регулювання не випадковий і визначається тим, що більшість технологічних процесів складається з операцій, пов'язаних зі зміною вмісту вологи в продукті, який переробляється (операції зволоження та зневоднення), та тим, що автоматизація таких процесів неможлива без наявності інформаційно-вимірювальних систем, які дозволяють отримувати експресну та дійсну інформацію про вологість продуктів, що переробляються. Можна назвати безліч технологічних процесів, нормальний хід яких буде неможливим, якщо вологість продукту, який переробляється, не витримується у вузьких і наперед заданих межах (наприклад, переробка апатиту на суперфосфат, різноманітні крекінгові процеси, багато технологічних процесів харчової промисловості, оброблення сільськогосподарських продуктів перед зберіганням, виробництво мінеральних добрив та ін.).

Істотно важливою є також інформація про вологість продуктів, які підлягають транспортуванню на далекі відстані по залізницях або водними шляхами, оскільки перевезення зайвої води теж коштує грошей. Необхідно звернути увагу на те, що матеріали з підвищеною вологістю при перевезеннях взимку змерзаються настільки, що їх розвантаження у місцях призначення стає неможливим без застосування спеціальних засобів.

Перші спроби створення приладів для експресного контролю вологості твердих і рідинних матеріалів мали місце приблизно 110 років тому. Однак через досить суттєві наукові та технічні труднощі протягом перших 35 років успіхи вчених та інженерів були більш ніж скромні і лише в останні 55 – 60 років теорія та практика вологометрії досягла значних успіхів, оскільки серйозні роботи в області вологометрії, які з'явилися, дозволили синтезувати та впровадити в різних галузях промисловості мілкі серії дискретних та безперервних вологомірів, які з успіхом експлуатуються протягом кількох років.

Найбільш розповсюджені принципи вимірювання вологості нафтопродуктів і твердих матеріалів наведено на рис. 3.1.

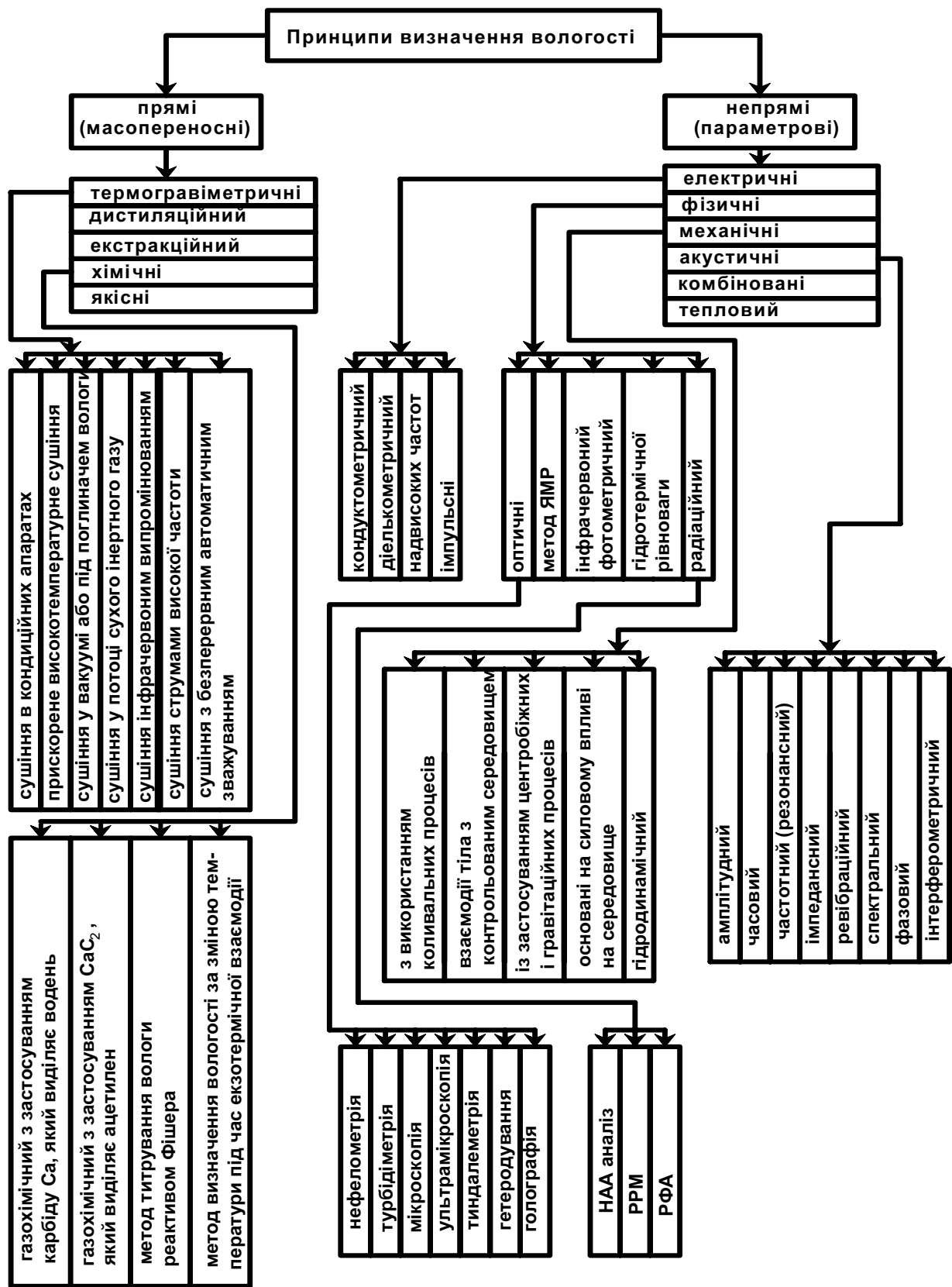


Рисунок 3.1 – Класифікація принципів визначення вологості матеріалів

3.1 Основи теорії високочастотної вологометрії рідин

Беручи до уваги те, що діелькометричний принцип вимірювання вологості матеріалів є найбільш поширеним, його реалізація відрізняється простотою та порівняно малим значенням інструментальної похибки і наявністю багатьох фізико-математичних моделей, що його описують, і, крім того, більшість відомих вологомірів працює за ємнісним (діелькометричним) принципом. Розглянемо його більш детально.

Головною відмінністю бінарних систем, а саме систем рідина – вода, є та обставина, що для них на відміну від твердих і сипких матеріалів існує можливість математично описати детермінований зв'язок між діелектричною проникністю (ДП) і вмістом води [4].

Вода з рідинами утворює або однорідні розчини, або мікогетерогенні дисперсні системи – емульсії. Взаємна розчинність рідин буває необмеженою або обмеженою, коли надлишок одного з компонентів приводить до утворення нової рідкої фази. Емульсії бувають прямими (типу мастило – вода) і зворотними (типу вода – мастило). У прямих емульсій мастило є дисперсною (внутрішньою) фазою, а вода – дисперсійним (безперервним) середовищем. У зворотних емульсій вода є дисперсною фазою, а мастило – дисперсійним середовищем. Тип емульсії залежить від властивостей компонентів, наявності поверхнево-активних речовин (ПАР) та об'ємного вмісту води (вологості). У деяких емульсіях при певних співвідношеннях компонентів відбувається перетворення фаз – перехід з типу вода – мастило у тип мастило – вода; інші рідини утворюють з водою лише один тип емульсій.

Діелькометричні вимірювання вологості рідин ґрунтуються на істотній відмінності ДП води від ДП інших рідин. Для чистої води характерна висока ДП ($\epsilon_s = 80$), у той час як для інших рідин (наприклад нафтопродуктів) її значення варіюється у межах $\epsilon_n = 2 \dots 4$.

Основи теорії бінарних систем були розроблені у ХІХ столітті. У процесі її розроблення було запропоновано певну кількість формул для визначення діелектричної проникності бінарної системи за об'ємним вмістом і діелектричною проникністю її компонентів. Найбільш поширені з них наведено у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Формули для визначення ДП бінарних систем

Автори формул	Формули у запису авторів
Зільберштейн, Ньютон	$\varepsilon = \varepsilon_n (1 - W) + \varepsilon_e W$
Бір	$\sqrt{\varepsilon} = W \sqrt{\varepsilon_e} + (1 - W) \sqrt{\varepsilon_n}$
Ліхтенеккер	$\lg \varepsilon = W \lg \varepsilon_e + (1 - W) \lg \varepsilon_n$
Лоренц	$\varepsilon = \frac{\varepsilon_n (\varepsilon_e + 2) + 2W (\varepsilon_e - \varepsilon_n)}{\varepsilon_e + 2 - W (\varepsilon_e - \varepsilon_n)}$
Ландауер	$W \frac{\varepsilon_e - \varepsilon}{\varepsilon_e + 2\varepsilon_n} + (1 - W) \frac{\varepsilon_n - \varepsilon}{\varepsilon_e + 2\varepsilon_n} = 0$
Ботчер	$\varepsilon = \varepsilon_n \left(1 + 3W \frac{\varepsilon_e - \varepsilon_n}{\varepsilon_e + 2\varepsilon_n} \right)$
Клаузіус – Моссоті, Лоренц, Вінер	$\frac{\varepsilon - \varepsilon_n}{\varepsilon + 2\varepsilon_n} = W \frac{\varepsilon_e - \varepsilon_n}{\varepsilon_e + 2\varepsilon_n}$
Оделевський	$\varepsilon = \varepsilon_n \left[1 + \frac{3W}{(1 - W)/3 + \varepsilon_n / (\varepsilon_e - \varepsilon_n)} \right]$
Бруггеман	$1 - W = \frac{\varepsilon_e - \varepsilon}{\varepsilon_e - \varepsilon_n} \sqrt[3]{\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon}}$
Кубо-Накамура	$3\varepsilon_e \lg \frac{\varepsilon_e - \varepsilon}{\varepsilon_e - \varepsilon_n} - (\varepsilon_e - 0,74) \lg \frac{\varepsilon + 0,37}{\varepsilon_e + 0,37} =$ $= (2,2\varepsilon_e + 0,81) \lg (1 - W)$

Як природні, так і штучні емульсії утворюють полідисперсні системи з широкою функцією розподілу, що дозволяє отримувати емульсії з $W > 0,8$. Діелектрична проникність таких емульсій, навіть

при провідному дисперсному середовищі, у якого $\varepsilon_e = \infty$, не дорівнює нескінченності, тому з розгляду можна виключити усі несиметричні формули, в яких ε не наближається до ДП води при $W \rightarrow 1$. Проведений аналіз демонструє, що з трьох формул, які залишились (Вінера, Бруггемана та Кубо-Накамури), найбільш коректно виводиться формула Вінера, яка придатна для будь-яких значень вологості.

Також розглянемо особливості роботи вологомірів в області високих частот, для яких діелектричну проникність визначають за формулою

$$\varepsilon = \varepsilon_n \left\{ 1 + \frac{3W}{D - W} \left[1 + 13,6F \frac{\varepsilon_e + 2\varepsilon_n}{\varepsilon_e + 36,5\varepsilon_n} \cdot \frac{(0,92 - W)^2}{D - W} \right] \right\},$$

де $D = \frac{\varepsilon_e + 2\varepsilon_n}{\varepsilon_e - \varepsilon_n}, F = \frac{0,111W}{0,72 - W}.$

Параметр F характеризує так званий коефіцієнт флокуляції. Згідно з флокуляційною теорією емульсія загалом може бути розглянута як суміш двох емульсій-компонентів, одна з яких складається з флокул (щільно упакованих дисперсних часток), а інша – дисперсійне середовище з одиночними дисперсними частинками. Для корекції ДП емульсії в цілому вводять коефіцієнт флокуляції F .

При $W < 0,1$ дисперсні частинки достатньо віддалені і $F = 0$. У цьому випадку наведена вище формула спрощується і перетворюється у формулу Вінера. У важких сортів нафти та деяких мазутів флокуляція також відсутня і їх ДП обчислюють за формулою Вінера

$$\varepsilon = \varepsilon_n \left\{ 1 + \frac{3W}{D - W} \right\}.$$

Згідно з цією формулою залежність відносної похибки вимірювання вологості δ_W від похибки вимірювання ДП емульсії δ_ε визначається так:

$$\delta_W = \delta_\varepsilon \frac{(1 + 2W)(1 - W)}{3W}.$$

З цього виразу видно, що для створення вологоміру класу 6 з шкалою 0...3% необхідний вимірник ДП емульсії класу 0,5.

Відмінність умов реальних вимірювань від умов градування вологомірів викликає зміну ДП емульсії $\Delta\varepsilon$, яка визначає зведену похибку вимірювання вологості, пов'язану зі шкалою вологоміра виразом

$$\delta_{3\varepsilon} = \delta_\varepsilon \frac{\Delta\varepsilon(1 - W)^2}{3\varepsilon_n W_{ш}}.$$

Наприклад, різниця між температурами градування вологоміра і вимірювання викличе приріст ДП емульсії, який залежить від температурного коефіцієнта ДП дисперсійного середовища α_n так:

$$\Delta\varepsilon_T = \varepsilon_n \alpha_n \Delta t \left[1 + \frac{3W}{1 - W} \right].$$

Зміна ДП емульсії призведе до температурної похибки вимірювання

$$\delta_{3\varepsilon T} = \alpha_n \Delta t \frac{1 + W}{3W_{ш}}.$$

Значення α_n для різних сортів нафти, масел і рідинних палив знаходиться в межах від $-4 \cdot 10^{-4}$ до $-1,5 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, тому зміна температури на 1 $^\circ\text{C}$ може викликати відносну похибку вимірювання від 0,4 до 1,5% при вимірюванні вологості порядку 3%, тому необхідно забезпечувати незмінність температури або уводити термокомпенсацію.

У емульсіях крім дисперсійного середовища та дисперсної фази присутні ПАР-емульгатори з ДП ε_e , які покривають дисперсні частинки тонким шаром. Зміна ДП емульсії через наявність ПАР з урахуванням того, що товщина шару емульгатора l набагато менше радіуса дисперсної частки a , може бути визначена так:

$$\Delta \varepsilon_e = \varepsilon_n \frac{13l}{3a} \frac{\varepsilon_e - \varepsilon_n}{\varepsilon_e} \frac{2 - W}{1 - W}.$$

На точність вимірів також може впливати різниця між тиском у перетворювачі при градуванні та тиском у процесі вимірювання. Залежність ДП вуглеводнів від тиску виглядає так:

$$1 - \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_p} = A \varepsilon_1 \lg \frac{B + P}{B + 1},$$

де ε_1 і ε_p – ДП вуглеводнів відповідно для нормального (10^5 Па) і поточного тиску P , Па; A і B – коефіцієнти, що характеризують речовину. Враховуючи те, що $A = 0,11 \dots 0,17$, а $B \geq 600$, попередній вираз можна спростити:

$$\Delta \varepsilon_{np} = 0,434 \frac{A}{B} P \varepsilon_n \left(1 + \frac{3W}{1 - W} \right).$$

Наявність вільного газу в емульсіях і його виділення у процесі вимірювань вологості у формі маленьких бульбашок з ДП, близькою до 1, може призвести до змін ДП емульсії на величину $\Delta \varepsilon_2$ при невеликому об'ємному вмісті газу W_2 :

$$\Delta \varepsilon_2 = -W_2 \frac{\varepsilon - 1}{2\varepsilon + 1} \varepsilon.$$

У деяких середовищах у процесі вимірювань електроди ємнісного перетворювача можуть покриватись тонким шаром іншої речовини.

Вплив такого покриття можна урахувати за допомогою формули для ДП діелектрика з декількох шарів, який складається з шару емульсії з ДП ε і шару покриття з ДП ε_c :

$$\Delta \varepsilon_c = \varepsilon W_c \frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_c + (\varepsilon - \varepsilon_c) \cdot W_c},$$

де W_c – об'ємний вміст шару домішок у робочому просторі датчика.

3.2 Первинні вимірювальні перетворювачі вологості нафтопродуктів

Будь-який первинний перетворювач вологості рідини будь-якого дієлькометричного вологоміра являє собою електричний конденсатор, електроди якого можуть мати різну конфігурацію залежно від умов вимірювання, а простір між цими електродами заповнюється досліджуваною речовиною.

При проведенні аналізу було встановлено, що вимірювальні перетворювачі сучасних дієлькометричних вологомірів, призначених для вимірювання вологості нафти, повинні задовольняти таким вимогам:

- мати велику робочу ємність для забезпечення високої чутливості та підвищення точності вимірювань;
- ті поверхні вимірювального перетворювача, які в процесі роботи контактують з речовиною, що досліджується, повинні мати гідрофобне покриття або виготовлятися з матеріалу з низькими адгезійними властивостями щодо суміші нафтопродуктів; це дозволить звести до мінімуму ефект налипання на металеві контактні поверхні важких фракцій нафтопродуктів;
- електроди вимірювального перетворювача своєю формою не повинні порушувати ламінарність потоку піддослідної рідини.

Одним з прикладів первинного перетворювача вологості є вимірювальна комірка [5], яка складається з електропровідного циліндричного корпусу 1, всередині якого симетрично розміщені чотири паралельних електроди 2, 3, 4, 5 у вигляді однакових порожнистих циліндрів (рис. 3.2).

Кріплення електродів і їх ізоляція один від одного і від корпусу здійснюються за допомогою втулок 6 і 7, виготовлених з ізоляційного матеріалу. Через радіальні проточки у втулці 7 електроди під'єднані до вимірювальної схеми та джерела живлення.

Безперервний потік палива, який протікає через комірку, проходить як всередині порожнистих електродів, так і у просторі між ними. Власне ємнісний датчик утворюється ємностями C_{23} і C_{45} між протилежними електродами 2, 3 і 4, 5.

Величина ємностей не залежить від радіальних розмірів електродів і визначається тільки діелектричною проникністю рідини, що заповнює вимірювальний простір:

$$C_{23} = C_{45} = \varepsilon h \frac{\varepsilon_0 \ln 2}{\pi},$$

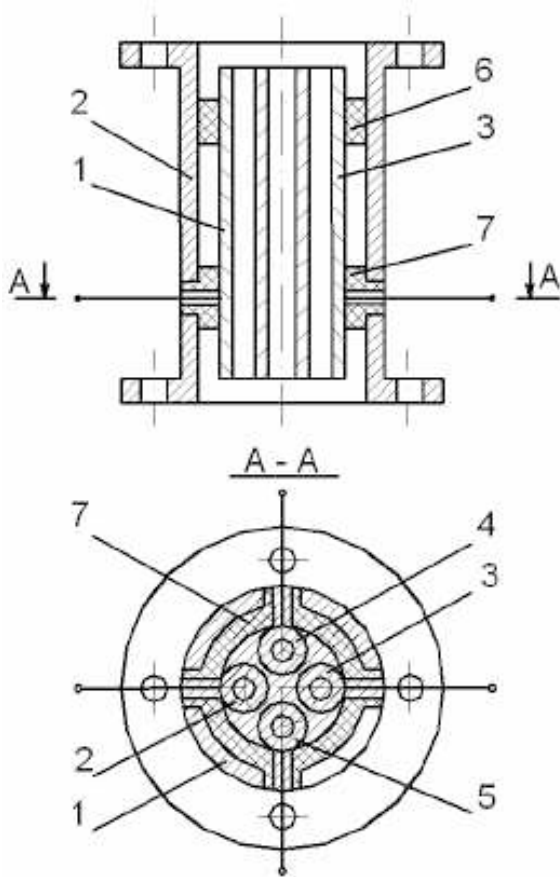


Рисунок 3.2 – Первинний перетворювач вологості

де ε – діелектрична проникність рідини; h – довжина електродів.

Автори цього пристрою пропонують спочатку подавати у простір комірки зневоднений нафтопродукт, а потім уже той, що підлягає дослідженню; різниця сигналів комірки, що відповідає цим режимам, оцінюється вимірювальною схемою (на рис. 3.2 відсутня).

Вимірювання вологості у такий спосіб може викликати певні ускладнення, хоча він є досить точним. Комірка, власне, має велику площу живого перерізу та електроди відповідного профілю, що не порушуватимуть ламінарність потоку рідини і не будуть затримувати рідину у вимірювальній комірці. І якби не необхідність застосування двох видів рідини для здійснення вимірювання, таку вимірювальну комірку можливо було б використати, наприклад, безпосередньо у нафто-

проводі. Додатковий недолік комірки такої конструкції – маленька початкова ємність, а значить, і низький рівень чутливості.

Ще однією оригінальною конструкцією є ємнісний датчик діелектричних властивостей газоподібних і рідинних середовищ, відомості про який детально викладені у [6].

Датчик містить електроди, під'єднані до вихідних клем і розташовані у кулеподібному корпусі 1 (рис. 3.3).

Корпус має впускний і випускний штуцери для пропускання потоку рідини або газу.

У стінці корпусу закріплені дві вихідні клемки 2, якими датчик з'єднується з вимірювальною схемою.

До кожної клеми з внутрішнього боку стінок корпусу одним кінцем під'єднаний гнучкий металевий дріт 3, що має поверхневе ізоляційне покриття, витки цього дроту зім'яті у клубок і розташовані у площині корпусу 1, причому вільні кінці кожного дроту знаходяться у загальній масі витків незалежно один від одного.

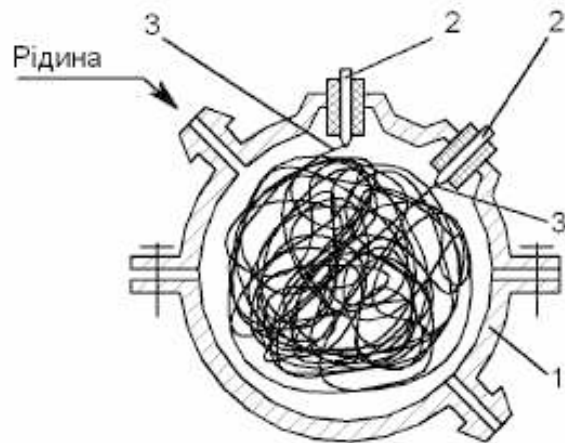


Рисунок 3.3 – Датчик вологості

Такий датчик має велику робочу ємність (1300...2000 пФ), а значить, і високий рівень чутливості.

Під час заповнення корпусу потоком рідини або під час зростання її напору можливі деформація та стискування дротів у зім'ятому клубку, що призведе до зміни його щільності, і, звісно ж, викличе зміну робочої ємності. Подібна конструкція виключає можливість її серійного виготовлення через неможливість виготовлення датчиків з однаковими електричними характеристиками. Ще один недолік – мала площа поперечного перерізу корпусу.

Конструкція, показана на рис. 3.4, у певній мірі дозволяє усунути недоліки попередніх. Це – ємнісний вимірювальний перетворювач [7], який складається з циліндричного корпусу з діелектрика та встановлених на його внутрішній поверхні електродів.

Електроди виконані у вигляді трикутних призм, установлених так, що дві суміжні грані утворюють плоский конденсатор та орієнтовані паралельно діаметру корпусу. Перетворювач, зображений на рис. 3.4, має досить високу початкову ємність, але й ряд істотних недоліків:

- мала площа поперечного перерізу корпусу;

- трикутні призми порушують ламінарність потоку робочої рідини, що зменшує точність вимірювального перетворювача. Як видно з рис. 3.4, значну площу робочого простору всередині корпусу вимірювального перетворювача займають трикутні

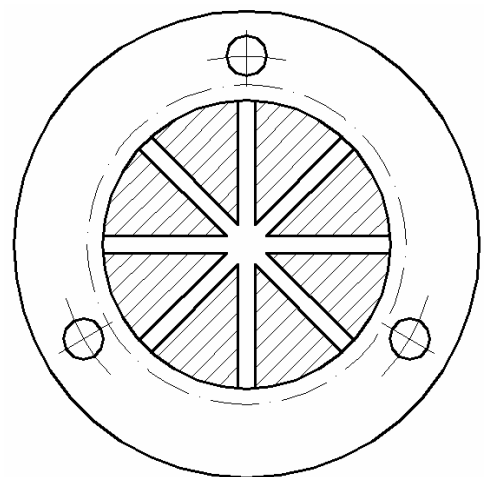


Рисунок 3.4 – Первинний перетворювач вологості

призми, тому ця площа не використовується.

Заболотний О.В, один з авторів даного посібника, розробив оригінальну конструкцію ємнісного вимірювального перетворювача, що має комплекс вигідних особливостей порівняно з наведеними вище аналогами. Зовнішній вигляд перетворювача показано на рис. 3.5, а перевагами даної конструкції є висока початкова ємність і велика площа поперечного перерізу. Це має суттєве значення при вимірюванні вологості нафтопродуктів безпосередньо у трубопроводі.



Рисунок 3.5 – Ємнісний перетворювач вологості

Робоча ємність такого перетворювача є стабільною. Забезпечено це тим, що датчик виймається повністю без порушення взаємного розташування електродів. Незважаючи на те що перетворювач пластинчастий, наведену конструкцію зручно використовувати у трубопроводі при проточних

вимірюваннях.

Як зображено на рис. 3.5, вимірювальний перетворювач складається з системи плоских електродів, причому шість електродів мають трапецієподібну форму та розміщені в центрі датчика, решту електродів виконано у вигляді V-подібних пластин [8]. Система електродів жорстко закріплена на внутрішній поверхні двох фторопластових кілець, а трапецієподібні пластини з'єднані попарно таким чином, щоб у місці з'єднання пластин кожної пари не було повітряного зазору.

З рис. 3.5 видно, що робоча ємність вимірювального перетворювача складається з ємностей дванадцяти пластинчастих повітряних конденсаторів, які утворені окремими V-подібними пластинами та V-подібними частинами з'єднаних попарно трапецієподібних пластин, і двох конденсаторів, розташованих у центрі перетворювача і також залежить від його зовнішнього діаметра та довжини.

Перші екземпляри вимірювальних перетворювачів виготовлялись за такими розмірами: довжина – 100 мм, зовнішній діаметр кілець – 98 мм, внутрішній – 85 мм і згідно з [9] були призначені для розміщення у вертикальному коліні трубопроводу з внутрішнім діаметром 100 мм. Але подальший досвід впровадження показав, що

залежно від конфігурації об'єкта, виділеного для встановлення перетворювача, досить часто виникає необхідність його розміщення у ділянці трубопроводу з іншим внутрішнім діаметром, що викликає зміну величини повітряного зазору між пластинами і, як наслідок, – зміну робочої ємності перетворювача. Виходячи з цих обставин, авторами запропоновано розрахункові залежності, що дозволяють легко обчислити конфігурацію датчика залежно від внутрішнього діаметра трубопроводу (рис. 3.6):

$$d = 3.864Z,$$

$$d_1 = 3.346Z,$$

$$L = 0.5\sqrt{D^2 - Z^2} - 1,866Z,$$

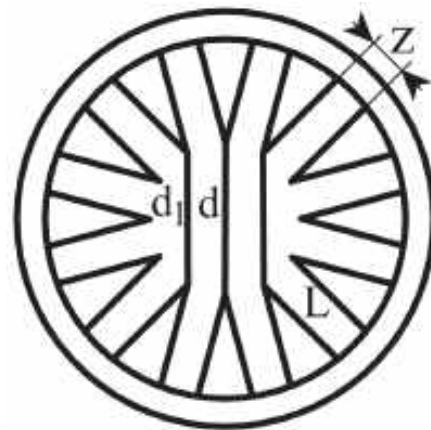


Рисунок 3.6. – Параметри вимірювального перетворювача

де d_1 – ширина центральної частини бічної пари трапецієподібних пластин; d – ширина центральної частини центральної пари трапецієподібних пластин;

Z – повітряний зазор між пластинами; L – ширина сторони V -подібної пластини; D – внутрішній діаметр фторопластових кілець.

Таким чином, знаючи внутрішній діаметр трубопроводу, призначивши величину зазору між пластинами вимірювального перетворювача і виходячи з уявлення про необхідну початкову ємність, за допомогою наведених вище формул легко обчислити конфігурацію електродів вимірювального перетворювача.

Для кожного з видів конструктивного виконання ємнісних датчиків існують різні методи розрахунку робочої ємності, однак загальним і найбільш точним методом для всіх видів є метод підрахунку просторових характеристик поля, утвореного повітряними проміжками [10].

Згідно з цим методом ємність будь-якого конденсатора може бути визначена з такого рівняння:

$$C_o = \varepsilon_o \left[\sum_1^r \varepsilon_r g_r + \sum_1^a \varepsilon_a g_a \right],$$

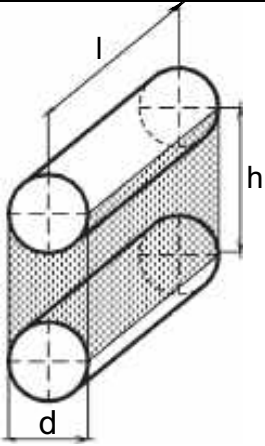
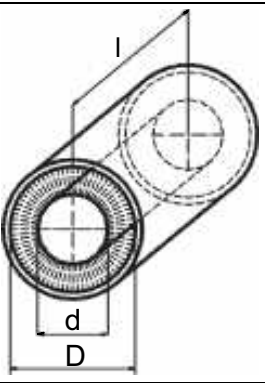
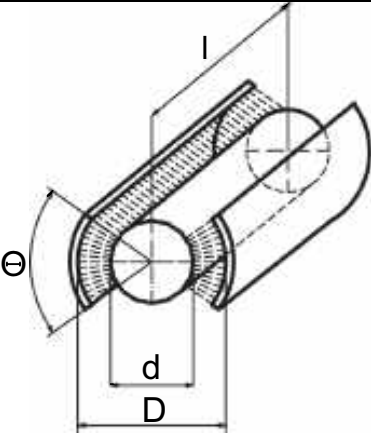
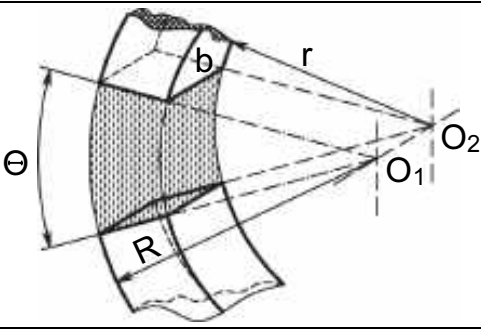
де C_o – початкова ємність конденсатора; ε_r – діелектрична проникність речовини основного зазору; ε_a – діелектрична проникність речовини за межами зазору; g_r – просторова характеристика поля зазору, м; g_a – просторова характеристика елемента зовнішнього поля, м.

Просторові характеристики основних полів зазорів, утворених різними формами електродів, наведено у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Просторові характеристики основного поля g_r , м

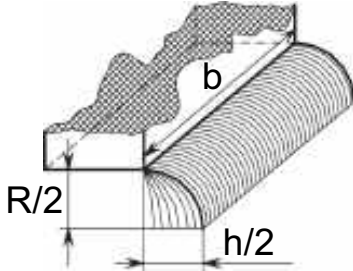
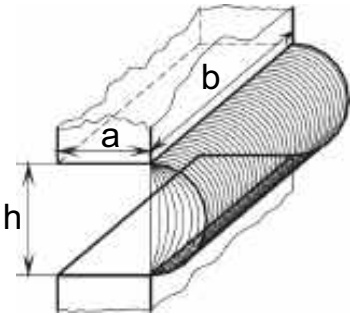
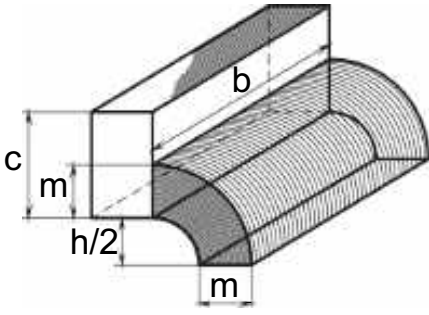
Форма зазору	Основні форми поверхонь електродів	Просторова характеристика
Куб, паралелепіпед		При $h < 0,1a$; $h < 0,1b$ $g_o = g_I = ab/h = S/h$ При $h \geq 0,1a$; $h \geq 0,1b$ $g_o = g_I + \sum g_a$
Циліндр		При $h < 0,1d$ $g_o = g_{II} = \pi d^2/4h =$ $= 0,785d^2/h$ При $h \geq 0,1d$ $g_o = g_{II} + 2(g_{13} + g_{14})$
Паралелепіпед без півциліндра		$g_o = g_{III} + \sum g_a$ $g_{III} = \frac{2\pi \cdot l}{\ln \left(\frac{2h}{d} + \sqrt{\left(\frac{2h}{d} \right)^2 - 1} \right)}$

Продовження таблиці 3.2

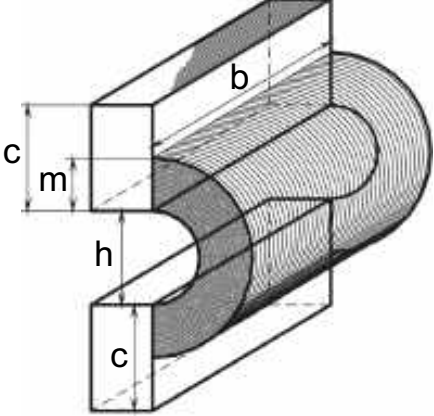
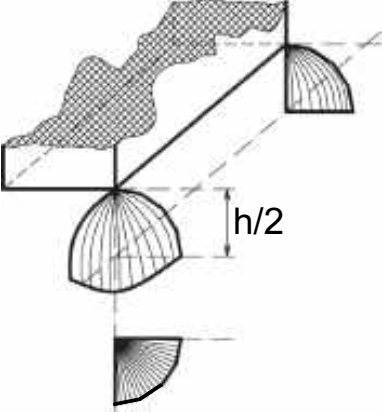
Форма зазору	Основні форми поверхонь електродів	Просторова характеристика
Паралелепіпед без двох півциліндрів		$g_0 = g_{IV} + \sum g_u$ $g_{IV} = \frac{\pi}{\ln \left(\frac{h}{d} + \sqrt{\left(\frac{h}{d} \right)^2 - 1} \right)}$
Циліндрична труба		$g_0 = g_V + 4(g_{13} + g_{14})$ $g_V = \frac{2\pi \cdot l}{\ln \frac{D}{d}}$
Частини циліндричної труби		<p>При $(D - d) < d$; $g_0 = g_{VI}$</p> $g_{VI} = \theta \cdot l / \ln \frac{D}{d}$
Частина кільця з прямокутним перерізом		<p>При $\theta < \pi/36$; $g_0 = g_{VII}$</p> $g_{VII} = \frac{b}{\theta} \ln \frac{R}{r}$

Просторові характеристики зовнішніх полів зазорів, утворених різними формами електродів, наведено у табл. 3.3.

Таблиця 3.3 - Просторові характеристики зовнішнього поля g_a , м

Форма зазору	Основні форми поверхонь електродів	Просторова характеристика
Чверть циліндра на стороні b		$g_1 = 0,52b$
Половина циліндра на стороні b		$g_2 = 0,26b$
Чверть циліндра на стороні a		$g_3 = 0,52a$
Половина циліндра на стороні a		$g_4 = 0,26a$
Чверть труби на стороні b		<p>При $c \ll h$; $m = c$</p> $g^I_s = 2 \frac{b}{\pi} \ln \left(\frac{2m}{h} + 1 \right)$ <p>При $c > h$; $m = (1 \dots 2)h$</p> $g^{II}_s = (0,694 \dots 1,025) \cdot b$

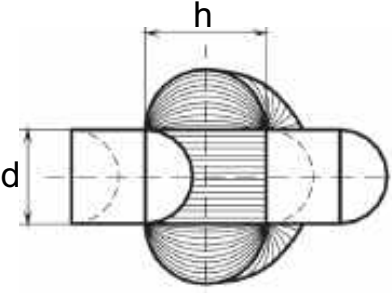
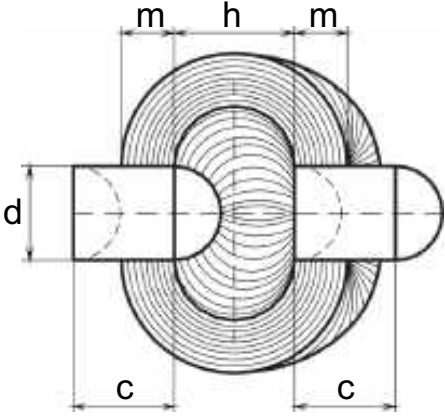
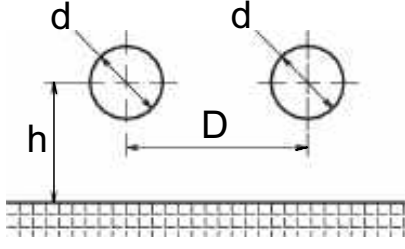
Продовження таблиці 3.3

Форма зазору	Основні форми поверхонь електродів	Просторова характеристика
Половина труби на стороні b		<p>При $c \ll h; m = c$</p> $g'_{6} = \frac{b}{\pi} \ln\left(\frac{2m}{h} + 1\right)$ <p>При $c > h; m = (1...2)h$</p> $g''_{6} = (0,347...0,512) \cdot b$
Чверть труби на стороні a		<p>При $c \ll h; m = c$</p> $g'_{7} = 2 \frac{a}{\pi} \ln\left(\frac{2m}{h} + 1\right)$ <p>При $c > h; m = (1...2)h$</p> $g''_{7} = (0,694...1,025) \cdot a$
Половина труби на стороні a		<p>При $c \ll h; m = c$</p> $g'_{8} = \frac{a}{\pi} \ln\left(\frac{2m}{h} + 1\right)$ <p>При $c > h; m = (1...2)h$</p> $g''_{8} = (0,347...0,512) \cdot a$
Половина кульового квадранта		$g_9 = 0.308h$

Продовження таблиці 3.3

Форма зазору	Основні форми поверхонь електродів	Просторова характеристика
Кульовий квадрант		$g_{10} = 0.077h$
Половина квадранта кульової оболонки		<p>При $c \ll h; m = c$</p> $g'_{11} = \frac{m}{2} = \frac{c}{2}$ <p>При $c > h; m = (1...2)h$</p> $g''_{11} = (0,5...1) \cdot h$
Квадрант кульової оболонки		<p>При $c \ll h; m = c$</p> $g'_{12} = \frac{m}{4} = \frac{c}{4}$ <p>При $c > h; m = (1...2)h$</p> $g''_{12} = (0,25...0,5) \cdot h$

Продовження таблиці 3.3

Форма зазору	Основні форми поверхонь електродів	Просторова характеристика
Половина тіла обертання половини кола діаметром d		$g_{13} = 1,63d$
Половина тіла обертання половини кільця з діаметрами $d + 2m$ і d		<p>При $c \ll h; m = c$</p> $g'_{14} = 2c + \frac{4d}{h/c + 1}$ <p>При $c > h; m = (1...2)h$</p> $g''_{14} = 2\left[(h + d) \dots \left(2h + \frac{4}{3}d\right)\right]$
Дводротова лінія довжиною l з урахуванням впливу землі		<p>При $h \gg D; D \gg d$</p> $g'_{15} = \frac{\pi \cdot l}{\ln \frac{D}{d}}$ $g''_{15} = \frac{\pi \cdot l}{\ln \left(\frac{h}{d} \frac{D}{\sqrt{4h^2 + D^2}} \right)}$

Повна просторова характеристика двох заряджених тіл має таку форму:

$$g_o = \sum_1^r g_r + \sum_1^a g_a, [M]$$

де g_r – геометрична провідність зазору (див. табл. 3.2); g_a – геометрична провідність елемента зовнішнього об'єму зазору (див. табл. 3.3); r – номер позиції, позначений римськими цифрами у

табл. 3.2; a – номер позиції, позначений арабськими цифрами у табл. 3.3.

Приклад 1. Розрахунок однопроменевого ємнісного датчика плоскопаралельного типу. Ємність однопроменевого датчика плоскопаралельного типу з урахуванням усіх можливих просторових характеристик поля може бути визначена за формулою для ємності конденсатора (див. с. 54). У загальному випадку, коли діелектриком датчика є повітря, а геометричні розміри електродів співвідносяться до відстані між ними як $h \geq 0,1a$; $h \geq 0,1b$, електричну ємність датчика обчислюємо так:

$$\begin{aligned}
 C_o &= \varepsilon_o \left[\sum_1^r \varepsilon_n g_r + \sum_1^a \varepsilon_n g_a \right] = \varepsilon_o \varepsilon_n \left[g_1 + 2(g_2 + g_4 + g_6^I + \right. \\
 &+ g_8 + 2g_{10} + 2g_{12}^I) \left. \right] = 8,854 \cdot 1,00059 \left\{ \frac{ab}{h} + 0,52(a + b) + \right. \\
 &+ 0,636 \left[\ln \left(\frac{2c}{h} + 1 \right) \right] (a + b) + 0,308h + c \left. \right\} \cdot 10^{-12} = \\
 &= 8,86 \left\{ \frac{ab}{h} + \left[0,52 + 0,636 \ln \left(\frac{2c}{h} + 1 \right) \right] (a + b) + \right. \\
 &+ 0,308h + c \left. \right\} \cdot 10^{-12},
 \end{aligned}$$

де g_1 – значення просторової характеристики поля у зазорі плоскопаралельного конденсатора (див. табл. 3.2); $g_2, g_4, g_6^I, g_8, g_{10}, g_{12}^I$ – значення просторових характеристик поля розсіювання (див. табл. 3.3).

Отримане значення ємності можна розкрити у такий спосіб:

$$C_o = 8,86 \frac{ab}{h} 10^{-12} + 8,86 \left\{ \left[0,52 + 0,636 \ln \left(\frac{2c}{h} + 1 \right) \right] \times \right.$$

$$\times (a + b) + 0,308h + c \} \cdot 10^{-12} = C_0^I + C_e,$$

де $C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon_n g_I = \varepsilon_0 \varepsilon_n \frac{ab}{h} = 8,86 \frac{S}{h} \cdot 10^{-12}$ – основна ємність конденсатора, Ф; C_e – ємність конденсатора через наявність полів розсіювання.

Таким чином, у найпростішому випадку, коли $h \leq 0,1a$; $h \leq 0,1b$, ємність плоскопаралельного конденсатора визначають за відомою формулою

$$C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon_n g_I = \varepsilon_0 \varepsilon_n \frac{ab}{h} = 8,86 \frac{S}{h} \cdot 10^{-12},$$

бо $C_e \approx 0$.

Приклад 2. Розрахунок робочої ємності ємнісного перетворювача вологості, показано на рис. 3.5, 3.6. З рис. 3.5 видно, що робоча ємність вимірювального перетворювача складається з ємностей дванадцяти пластинчастих повітряних конденсаторів, які утворені окремими V-подібними пластинами, V-подібними частинами з'єднаних попарно трапецієподібних пластин і двох конденсаторів, розташованих у центрі перетворювача, і безпосередньо залежить від його зовнішнього діаметра та довжини.

У спрощеному варіанті просторова характеристика плоскопаралельного конденсатора обчислюється за відомою формулою

$$g_I = \frac{L \cdot l}{Z},$$

де l – довжина V-подібної пластини, м.

Вона являє собою значення просторової характеристики основного поля у зазорі плоскопаралельного конденсатора (див. першу строку табл. 3.2). Але для кожного конденсатора мають місце поля розсіювання. У нашому випадку вони утворюють такі просторові характеристики (див. табл. 3.3):

- половину циліндра на стороні l : $g_2 = 0.26 \cdot l$;
- половину циліндра на стороні L : $g_4 = 0.26 \cdot L$;
- половину труби на стороні l : $g_6 = \frac{l}{\pi} \ln\left(\frac{2m}{Z} + 1\right)$;
- половину труби на стороні L : $g_8 = \frac{L}{\pi} \ln\left(\frac{2m}{Z} + 1\right)$;
- кульовий квадрант: $g_{10} = 0.077 Z$;
- квадрант кульової оболонки: $g_{12} = m/4$.

Чотири з дванадцяти V-подібних електродів взаємодіють з центральними частинами обох бічних пар трапецієподібних пластин і утворюють ще два типи просторових характеристик:

- чверть циліндра на стороні l : $g_1 = 0.52 l$;
- чверть труби на стороні l : $g_5 = \frac{2l}{\pi} \ln\left(\frac{2m}{Z} + 1\right)$.

Повний математичний вираз для обчислення початкової ємності вимірювального перетворювача, зображеного на рис. 3.5, формується з трьох складових (ємності, створеної V-подібними електродами C_{01} , ємності, створеної центральними частинами трапецієподібних електродів C_{02} , та ємності, яка є результатом взаємодії V-подібних електродів з центральними частинами трапецієподібних C_{03}) і має такий вигляд:

$$C_{01} = \varepsilon_o \varepsilon \cdot \left[\frac{L \cdot l}{Z} + 2(0.26(l+L)) + \frac{1}{\pi} \ln\left(\frac{2m}{Z} + 1\right)(l+L) + 2 \cdot 0.077 Z + \frac{m}{2} \right] \cdot 12,$$

$$C_{02} = \varepsilon_o \varepsilon \cdot \left[\frac{(d+d_1) \cdot l}{2Z} + 2 \left(0.26 \cdot \left(l + \frac{d+d_1}{2} \right) + \frac{1}{\pi} \ln\left(\frac{2m}{Z} + 1\right) \left(l + \frac{d+d_1}{2} \right) + 2 \cdot 0.077 \cdot Z + \frac{m}{2} \right) \right] \cdot 2,$$

$$C_{03} = \varepsilon_o \varepsilon \cdot \left[2 \cdot \left(0.52l + \frac{2l}{\pi} \ln\left(\frac{2m}{Z} + 1\right) \right) \right] \cdot 4,$$

де m – товщина електрода, м.

Повна ємність перетворювача дорівнює сумі ємностей C_{01} , C_{02} і C_{03} .

Приклад 3. Синтез метрологічної моделі ємнісного перетворювача вологості, показаного на рис. 3.5, 3.6. З метою орієнтовного визначення метрологічних властивостей датчика

вологості у роботі [11] пропонується структурна схема діелькометричного первинного перетворювача (рис. 3.7). Ланкою 1 описано зв'язок “склад – властивість”, тобто перетворення вологості у фізичну властивість – діелектричну проникність. Ланка 2 є первинним вимірювальним перетворювачем, на виході якого

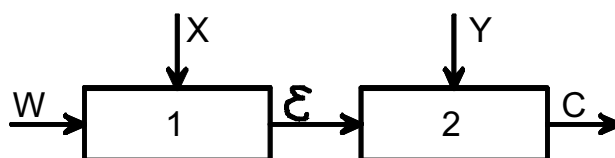


Рисунок 3.7 – Структурна схема перетворювача

отримують корисний вихідний сигнал, зручний для подальшого оброблення. Для діелькометричних вологоміврів – це ємність C . На перетворення інформації впливають гіпотетичні фактори X і Y . До факторів X належать: температура емульсії; густина нафти; домішки з діелектричними проникностями, що відрізняються від діелектричної проникності нафти; спотворення форми дисперсних частинок. До факторів Y , що впливають на перетворення діелектричної проникності в ємність, відносять: температуру емульсії; домішки, що утворюють плівку на обкладинках конденсатора; виробничо-технологічні фактори.

Ємність датчика обчислюють як суму робочої і паразитної ємностей:

$$C_o = C_p + C_n.$$

Робоча ємність запропонованого авторами датчика вологості визначається як

$$C_p = C_{01} + C_{02} + C_{03},$$

де складові C_{01} , C_{02} і C_{03} визначено у прикладі 2.

Залежність між діелектричною проникністю емульсії ϵ і вологістю W може бути подана формулою Ньютона – Зільберштейна [4] для емульсії, що має певну кількість флокуляційних включень:

$$\varepsilon = \left\{ 1 + \frac{3W}{D - W} \left[1 + 13,6F \frac{(\varepsilon_e + 2\varepsilon_n)(0,92 - W)^2}{(\varepsilon_e + 36,5\varepsilon_n)(D - W)} \right] \right\}; \quad D = \frac{\varepsilon_e + 2\varepsilon_n}{\varepsilon_e - \varepsilon_n},$$

де ε_e – діелектрична проникність води; ε_n – діелектрична проникність нафтопродукту; F – коефіцієнт флокуляції.

Вважатимемо, що флокуляція у нашому випадку не спостерігається, і діелектричну проникність можна визначити за формулою Вінера

$$\varepsilon = \varepsilon_n \left(1 + \frac{3W}{D - W} \right).$$

Вплив температури на зміну діелектричної проникності та ємності датчика вологості має таку аналітичну форму:

$$\varepsilon_{nt} = \varepsilon_{nto} (1 + K\Delta t),$$

де $\Delta t = t - t_o$ – зміна температури; ε_{nto} і ε_{nt} – діелектрична проникність нафтопродукту для температур t_o і t відповідно; K – температурний коефіцієнт діелектричної проникності.

Вплив відносної густини нафтопродукту (співвідношення густини нафти до густини води за нормальних умов) на зміну діелектричної проникності та ємності датчика вологості має такий вид:

$$\varepsilon_{nr} = \varepsilon_{nr_o} \left(1 + \frac{\Delta \varepsilon_{nr}}{\varepsilon_{nr_o}} \right) = \varepsilon_{nr_o} \left(1 + \frac{2,33\Delta \rho}{\varepsilon_{nr_o}} \right),$$

де $\Delta \rho = \rho - \rho_o$ – зміна густини; ε_{nr_o} і ε_{nr} – діелектрична проникність нафти з густиною ρ_o і ρ відповідно.

Запропонований датчик вологості має таку конфігурацію, що зміну його ємності через температуру розширення матеріалу електродів можна не брати до уваги.

Якщо ввести позначення

$$T_1 = \varepsilon_o \left[\frac{L \cdot l}{Z} + 2(0.26(l + L)) + \frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{2m}{Z} + 1 \right) (l + L) + 2 \cdot 0.077Z + \frac{m}{2} \right] \cdot 12;$$

$$T_2 = \varepsilon_o \left[\frac{(d+d_1)l}{2Z} + 2 \left(0.26 \left(l + \frac{d+d_1}{2} \right) + \frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{2m}{Z} + 1 \right) \left(l + \frac{d+d_1}{2} \right) + 2 \cdot 0.077Z + \frac{m}{2} \right) \right] \cdot 2;$$

$$T_3 = \varepsilon_o \left[2 \cdot \left(0.52l + \frac{2l}{\pi} \ln \left(\frac{2m}{Z} + 1 \right) \right) \right] \cdot 4;$$

$$C_p = \varepsilon [T_1 + T_2 + T_3],$$

то статична характеристика перетворювача з урахуванням впливу зміни температури та густини нафти має таку форму:

$$C_{t,\rho} = (T_1 + T_2 + T_3) \left(1 + \frac{2,33\Delta\rho}{\varepsilon} \right) \varepsilon + (T_1 + T_2 + T_3) \left(1 + \frac{2,33\Delta\rho}{\varepsilon} \right) K \varepsilon \Delta t.$$

Похибку від впливу густини та температури обчислюємо за формулою повного диференціалу:

$$\Delta C = \frac{\partial C}{\partial t} \Delta t + \frac{\partial C}{\partial \rho} \Delta \rho;$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = (T_1 + T_2 + T_3) \left(1 + \frac{2,33\Delta\rho}{\varepsilon} \right) K \varepsilon;$$

$$\frac{\partial C}{\partial \rho} = 2,33 K \Delta t (T_1 + T_2 + T_3);$$

$$\Delta C = (T_1 + T_2 + T_3) \left(\left(1 + \frac{2,33\Delta\rho}{\varepsilon} \right) K \varepsilon \cdot \Delta t + 2,33 K \Delta t \Delta \rho \right).$$

Проаналізуємо ступінь впливу наведених факторів на результат перетворення значення вологості у ємність ємнісним датчиком вологості за таких умов: $K = - 10^{-3} 1/^\circ\text{C}$; $\Delta t_{\max} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta \rho_{\max} = 0,1$. Такі умови зазвичай виконуються для більшості нафтопродуктів та умов експлуатації вологомірів:

$$\Delta C = -80 \cdot \left(\left(1 + \frac{2,33 \cdot 0,1}{2,5} \right) \cdot 10^{-3} \cdot 2,5 \cdot 40 + 2,33 \cdot 10^{-3} \cdot 40 \cdot 0,1 \right) =$$

$$= -1,52, \text{ нФ.}$$

Відповідно до нормативного документа [5] визначимо клас точності датчика вологості за умови визначення вологості мазуту в діапазоні 0...15% і 0...60% відповідно.

Для цього визначимо граничні значення ємності датчика вологості для означених діапазонів вологості, застосувавши відповідну формулу і пам'ятаючи, що ємність датчика у зневодненому мазуті дорівнює 200 пФ:

$$C_p = \varepsilon [T_1 + T_2 + T_3] = \varepsilon_n \left(1 + \frac{3W}{\frac{\varepsilon_e + 2\varepsilon_n}{\varepsilon_e - \varepsilon_n} - W} \right) [T_1 + T_2 + T_3];$$

$$C_{p15} = 2,5 \left(1 + \frac{3 \cdot 0,15}{\frac{81 + 2 \cdot 2,5}{81 - 2,5} - 0,15} \right) \cdot 80 = 294 \text{ нФ};$$

$$C_{p60} = 2,5 \left(1 + \frac{3 \cdot 0,6}{\frac{81 + 2 \cdot 2,5}{81 - 2,5} - 0,6} \right) \cdot 80 = 926 \text{ нФ};$$

$$\gamma_{15} = \frac{1,52}{294 - 200} \cdot 100\% = 2\%; \quad \gamma_{60} = \frac{1,52}{926 - 200} \cdot 100\% = 0,2\%.$$

Враховуючи те, що значення максимальної абсолютної похибки не залежить від зростання діелектричної проникності водно-мазутної емульсії, можна здійснити її компенсацію у вимірювальній схемі вологоміра уведенням поправки.

3.3 Первинні вимірювальні перетворювачі вологості сипких матеріалів

Для ємнісних систем вимірювання вологості сипких матеріалів справедливий вираз

$$dC = \frac{\partial C}{\partial W} dW + \frac{\partial C}{\partial T} dT + \frac{\partial C}{\partial \Gamma} d\Gamma + \frac{\partial C}{\partial X} dX \dots,$$

де C – ємність комірки; W – вологість; T – температура; Γ – гранулометричний склад; X – хімічний склад.

Задача вимірювання вологості буде вирішена тим краще, чим повніше вологометрична система забезпечує виконання умов

$$\frac{\partial C}{\partial W} \rightarrow \max \quad i \quad \Sigma \left(\frac{\partial C}{\partial T}; \frac{\partial C}{\partial \Gamma}; \frac{\partial C}{\partial X} \right) \rightarrow \min.$$

Усі типи ємнісних вимірювальних перетворювачів для визначення вологості сипких матеріалів зведені в єдину класифікацію (рис. 3.8).



Рисунок 3.8 - Класифікація ємнісних вимірювальних перетворювачів вологості сипких матеріалів

Прикладом занурюваного електричного перетворювача вологості є пристрій, показаний на рис. 3.9 [12].

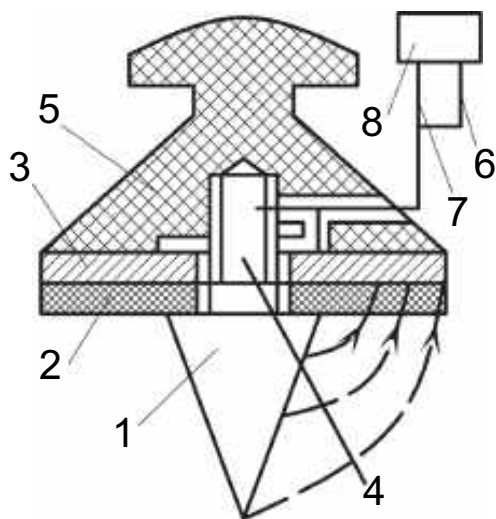


Рисунок 3.9 – Перетворювач вологості

Елемент зондування датчика вологості містить робочий електрод, який виконано у формі конусного клина 1, і загальний електрод у формі шайби з розташованою на основі конусного клина підложкою 2, на яку з боку, протилежного місцю контакту шайби з конусним клином, нанесено струмопровідний шар 3. При цьому зовнішній діаметр шайби, утвореної підложкою 2 і струмопровідним шаром 3, значно перевищує діаметр основи конусного клина, а її внутрішній діаметр – менше діаметра конусного клина. Взаємна фіксація робочого і загального електродів здійснюється

шляхом нагвинчування на хвостовик 4 робочого електрода ручки 5, у якій є центральний отвір для пропускання електричних відводів 6 і 7 до входів електронно-вимірювального блока 8. При цьому другий кінець електричного відводу 6 під'єднано безпосередньо до хвостовика 4, а електричний відвід 7, що проходить по канавці, яка виконана на циліндричній поверхні хвостовика, підімкнено до струмопровідного шару 3 загального електрода.

При зануренні конусного клина 1 у шар матеріалу за допомогою поверхні, яка утворюється діелектричною підложкою 2, матеріал стискається до потрібного ступеня щільності. Потім вмикається електронно-вимірювальний блок 8. Навколо робочого електрода, виконаного у вигляді конусного клина 1, утворюється симетричне електричне поле (показано стрілками), яке взаємодіє з масою досліджуваного матеріалу. Ця взаємодія виявляється у зміні діелектричної сталої залежно від ступеня вологості матеріалу. Форма конусного клина дозволяє легко занурювати його у досліджувану речовину. Розташування загального електрода, виготовленого у формі підложки 2 і струмопровідного шару на основі клина 4, є перпендикулярне та симетричне його поздовжній осі з урахуванням його значно більшої площі, ніж площа основи клину 1 і забезпечує отримання потрібної щільності матеріалу при простій конструкції та економічності виготовлення датчика. Така побудова дозволяє

виключити проходження постійної складової сигналу до загального електрода як безпосередньо від робочого електрода, так і крізь досліджуваний матеріал. Це дозволяє підвищити точність вимірювань і розширити діапазон використання датчика, а вибір внутрішнього діаметра шайби меншим відносно діаметра основи конусного клина 1 зменшує вплив високої напруги електричного поля, що виникає у зоні граничних торцевих ділянок загального та робочого електродів і, таким чином, дозволяє забезпечити високу чутливість датчика.

Показаний датчик не дає можливості врахувати щільність матеріалу при вимірюванні вологості; ще один недолік – відсутність термокомпенсації.

На рис. 3.10 показано конструкцію ємнісного датчика вологості землі [13]. Датчик містить стрижень 1, чутливі елементи 2 і 3, конусний наконечник 4, вимірювальну схему 5, пружний елемент 6, виконаний у формі пружини, компенсаційний конденсатор, виконаний у формі двох електродів 7 і 8.

Електрична схема пристрою складається з послідовно з'єднаних вимірювального конденсатора **С_x**, утвореного чутливими елементами 2 і 3, компенсаційного конденсатора **С_к**, виконаного у вигляді двох електродів 7 і 8, і вимірювального пристрою 5, підімкненого до послідовно з'єднаних конденсаторів **С_x** і **С_к**.

Рух конусного наконечника 4 уздовж стрижня 1 під дією реакції тиску землі переміщує електрод 8 відносно електрода 7 і змінює ємність компенсаційного конденсатора, утвореного електродами 7 і 8. При русі конусного наконечника 4 стискається пружина 6. Сила реакції пружини на конусний наконечник пропорційна щільності землі. Сумарна ємність датчика, який складається з вимірювального конденсатора, утвореного чутливими елементами 2 і 3, і компенсаційного конденсатора, утвореного електродами 7 і 8, змінюється не тільки пропорційно вологості, але й зворотно-пропорційно щільності землі, що дозволяє врахувати зміну щільності досліджуваного матеріалу. Спосіб компенсації можливої зміни маси досліджуваного матеріалу відтворено у датчику вологості [14].

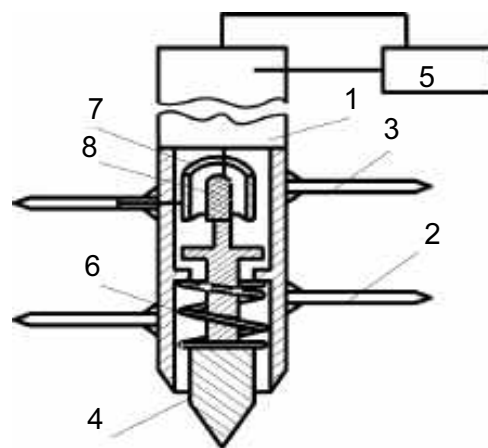


Рисунок 3.10 – Датчик вологості

Датчик складається з зовнішнього циліндричного електрода 1, внутрішнього конічного електрода 2, дна датчика 3, ваговимірювальної пружини 4, корпусу 5 та ізоляційних тримачів 6 (рис. 3.11). Зовнішній електрод 1 нерухомо закріплений на корпусі 5, внутрішній електрод 2 має конусоподібну форму і за допомогою ізоляційних тримачів 6

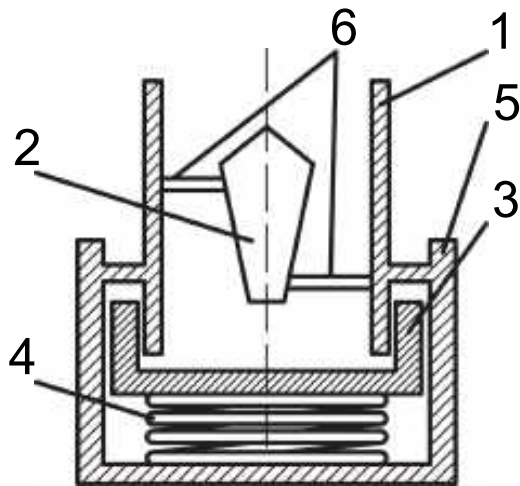


Рисунок 3.11 – Датчик вологості сипких матеріалів

кріпиться на зовнішньому електроді 1. Дно 3 виготовлено у формі стаканця і спирається на верхню частину ваговимірювальної пружини. Воно може пересуватися зверху вниз і навпаки на 6...8 мм. Корпус 5 датчика є нерухомим, на ньому жорстко зафіксований зовнішній електрод 1 датчика і встановлена ваговимірювальна пружина 4. Корпус є основою усієї конструкції.

Тримачі 6 фіксують електрод 2 нерухомо відносно зовнішнього електрода 1.

Конструктивне виконання дна у формі стаканця запобігає висипанню досліджуваного матеріалу з датчика при вертикальному пересуванні дна відносно корпусу.

Вимірювальною зоною датчика є простір між електродами 1, 2 і у вимірюванні вологості бере участь та частина досліджуваного матеріалу, яка знаходиться між електродами 1, 2.

Датчик працює так. Після засипання фіксованого об'єму матеріалу він своєю масою тисне на дно 3 і пружину 4 датчика, внаслідок чого пружина стискається і дно 3 пересувається вертикально зверху вниз.

Зазвичай об'ємна маса зерна змінюється залежно від культури, сорту, регіону вирощування, якості врожаю та ін., що впливає на показання датчика вологості.

У датчику різна маса досліджуваного матеріалу викликає стиснення пружини 4 відповідного ступеня і пересування дна 3 у вертикальній площині на різну відстань.

Чим більша маса досліджуваного матеріалу, тим сильніше буде стиснена пружина і дно 3 переміститься вниз на більшу відстань. Таким чином, надлишок проби виводиться з зони вимірювання.

Пружина 4 підібрана так, що у зоні вимірювання постійно знаходиться частина проби однієї й тієї ж маси.

3.4 Промислові вологоміри нафтопродуктів і сипких матеріалів

Щодо побудови вторинних перетворювачів вологи за останні 70 років спроектовано дуже велику кількість різноманітних електронних схем, які забезпечують перетворення зміни електричної ємності у зміну сталої напруги або струму, зміну частоти імпульсів, зміну тривалості імпульсів, форми імпульсів та ін.

Одним з найпоширеніших варіантів перетворення зміни ємності у зміну сталої напруги або струму є використання вимірювального моста, схему якого зображено на рис. 3.12.

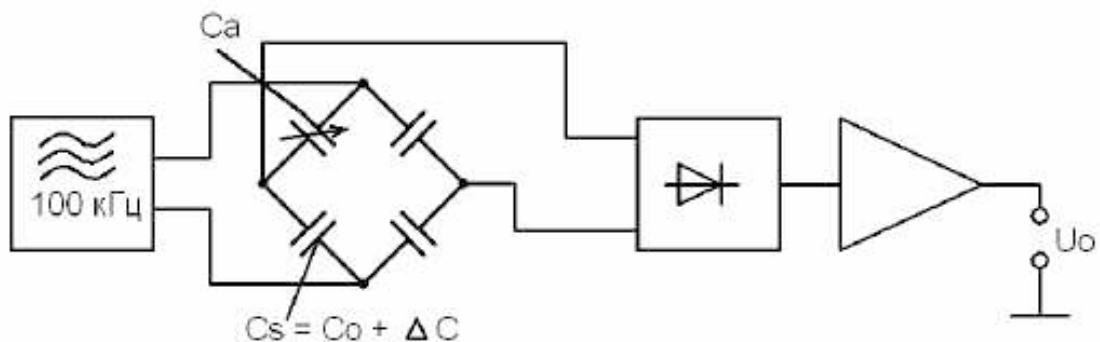


Рисунок 3.12 – Схема з ємнісним вимірювальним мостом

Схема складається з моста для вимірювання ємності з датчиком вологості C_s в якості активного елемента. Міст живиться змінною напругою частотою приблизно 100 кГц. За допомогою підстроювального конденсатора C_a вихідна напруга U_0 установлюється на нульове значення при $\Delta C = 0$. При зміні ємності ΔC вихідна напруга U_0 є мірою цієї зміни і, відповідно, мірою зміни вологості.

Також широке розповсюдження мають схеми, що працюють за різницею імпульсів (рис. 3.13). Схема складається з двох мультивібраторів M_1 і M_2 , причому M_1 синхронізує M_2 . При $\Delta C = 0$ тривалість імпульсів обох мультивібраторів однакова ($t_1 = t_2$). Якщо

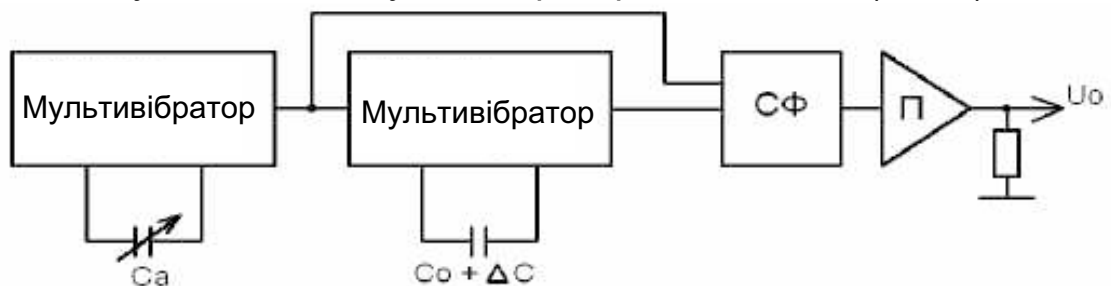


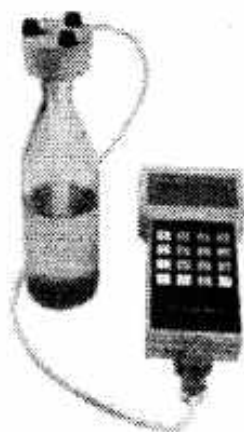
Рисунок 3.13 – Схема з мультивібраторами

ємність датчика зміниться, схема формування СФ утворить різницевий імпульс тривалістю $t_3 = t_2 - t_1 = \Delta C$ і перетворить його у сталу напругу, яка після підсилювання підсилювачем Π буде дорівнювати U_0 . Якщо період прямокутного імпульсу дорівнює $T = 2 t_1$, а амплітуда імпульсів – U_e , то для середнього значення вихідної напруги U_0 маємо рівняння

$$U_0 = K \frac{t_3}{T} U_e = K \frac{\Delta C}{2C_0} U_e,$$

де K – коефіцієнт підсилювання підсилювача Π .

Вимірник вологості рідинних і сипких матеріалів «ВАД-40М». Прилад занесено до державного реєстру Російської Федерації РФ № 2205-01 (рис. 3.14).



а



б

Рисунок 3.14 – Вологомір «ВАД-40М»: а – з датчиком вологості нафтопродуктів; б – з датчиком вологості сипких матеріалів

Прилад призначений для експресного неруйнівного вимірювання вмісту води у різних твердих і рідинних матеріалах у харчовій, фармацевтичній, хімічній промисловості, будівництві та ін. Його універсальність забезпечується використанням різних типів датчиків: насипних, наливних, занурюваних і проточних. Одночасно «ВАД-40М» є вимірником температури у діапазоні $0 \dots 100$ °С.

Прилад має такі технічні характеристики:

- похибка на рівні 10% не перевищує 0,5%;
- похибка вимірювання температури не перевищує 0,5 °С;

- час вимірювання – 0,5 с;
- габаритні розміри (без датчика) – 100×190×70 мм;
- вага приладу без датчика – не більше 0,5 кг;
- споживана потужність від побутової мережі 220 В – 3 ВА;
- споживана потужність від вбудованого акумулятора – 1 ВА.

Прилад забезпечує: вимірювання відносної вологості у діапазоні 0...80%; вимірювання температури у діапазоні 0...100 °С; відображення інформації на цифровому індикаторі; градування приладу користувачем для потрібних матеріалів; зберігання градувальних кривих у пам'яті приладу; зв'язок з ЕОМ за допомогою інтерфейсу RS-232.

Цифровий вимірник вологості зерна WILE-55. Прилад працює в області високих частот на внутрішньому мікропроцесорі, а також з використанням системи компенсації температури (рис. 3.15).

Прилад обладнаний шкалою прямого зчитування для 12 типів зерна, дозволяє здійснювати самостійне калібрування і повертатися до заводських калібровок, які зберігаються у пам'яті мікропроцесора.

Технічні дані:

- діапазон вимірювання – 6...35%;
- точність – $\pm 0,5\%$;
- живлення – батарейка 9 В типу 6F22;
- маса – 1,5 кг;
- діапазон робочих температур – -15...+55 °С;
- наявність автоматичної температурної

компенсації.



Рисунок 3.15 – Прилад «WILE-55»

Вологомір плоских і сипких матеріалів BE MT 260. Прилад призначений для експресного визначення вологості сипких матеріалів, волокон, тканин у лабораторних і цехових умовах (рис. 3.16). Передбачено режим автоматичного калібрування приладу на різні види матеріалів з можливістю зберігання у пам'яті трьох і більше калібрувальних кривих. За замовленням комплектується плоскими електродами для вимірювання вологості плоских матеріалів (тканина, пластик та ін). Вологомір BE складається з вимірювального цифрового блока та змінних первинних перетворювачів: коаксіального (для сипких



матеріалів) і компланарного (для виробів з плоскою поверхнею).

Технічні характеристики:

- діапазон вимірювання – 1...20%;
- дискретність – 0,1%;
- тривалість одного виміру – 2...8 с;
- похибка вимірювання – 1%;
- цифрова індикація – три розряди;
- живлення – 220 В, 50 Гц;
- навколишня температура – 5...40 °С.

Рисунок 3.16 – Вологомір
BE MT 260

Зерновий вологомір PM-400 фірми Kett, Японія. Вологомір призначений для вимірювання вологості зернових, зернобобових і бобових культур в умовах збирання, зберігання та переробки (рис. 3.17).



Прилад дозволяє вимірювати вологість 12 культур, таких, як пшениця, ячмінь, кукурудза, соя, рапс, овес, соняшник, гречка та ін.

Технічні характеристики:

- принцип вимірювання – діелькометричний;
- діапазон вимірювання – 6...40%;
- похибка вимірювання – 0,5%;
- об'єм досліджуваної проби – 240 мл;
- дисплей РКІ – до трьох цифр;
- живлення – чотири батареї по 1,5 В;
- габаритні розміри - 210×130×190 мм;
- маса – 1 кг.

Рисунок 3.17 – Прилад Перелік функцій: усереднення результатів вимірів; автоматичне вимикання; індикація розряду батареї; зміщення градуувальної характеристики ($\pm 9,9\%$); уведення автоматичної температурної поправки.

3.5 Метрологічне забезпечення приладів для вимірювання вологості нафтопродуктів

Основними засобами для даного випадку є перевірочні рідини, атестовані за процедурою приготування. Для їх приготування беруть

дозовані кількості «еталонних» рідин і змішують їх з метою отримання стійкої емульсії з рівномірними розподілом у ній частинок сторонніх включень [15].

Під «еталонною» рідиною розуміють рідину, яка не містить частинок сторонніх включень, наприклад, зневоднена «суха» нафта. Для зневоднення нафту піддають центрифугуванню, пропускають через хімічні реагенти (хлористий кальцій, силікагель) або відганяють воду на дистиляційній колонці. Атестацію зневодненої рідини проводять за допомогою квадрупольного датчика, що являє собою посуд з розміщеними всередині нульовим і потенційним електродами. У датчик заливають рідину та вимірюють його електричну ємність. Потягом 10 хвилин на датчик подають високу напругу. Нафта вважається зневодненою (з вологістю не більше $\pm 0,01\%$), якщо за цей час ємність зміниться не більше ніж на 0,05 пФ. При виготовленні зневодненої нафти можливі зміни її фізико-хімічних властивостей і структури. Тому в якості «еталонної» рідини зазвичай використовують нафту з мінімальним залишковим вмістом води, який визначають зразковим вимірником вологості та враховують при визначенні концентрації виготовленої емульсії.

Суміші рідин диспергують на механічних диспергаторах, які входять у комплект засобів повірки вологомірів УВПН-2. Механічні диспергатори забезпечують емульгування частинок води в нафті розміром до 10 мкм. Можливе використання різних мішалок, ультразвукових диспергаторів. При диспергуванні необхідно слідкувати за тим, щоб в емульсію не потрапляло повітря. Потрібна стійкість емульсії досягається збільшенням часу диспергування або кількості оборотів диспергатора. Крім диспергатора в комплект засобів повірки УВПН входять дистиляційна установка для атестації перевіркової проби, установка осушування нафти, набір мір місткості, вольтметр і джерело живлення. Наявність у складі комплекту УВПН-2 дистиляційної установки дозволяє відмовитись від глибокого осушування нафти та не змінювати склад перевіркової проби.

Для виготовлення емульсії підвищеної вологості (більше 15%) рекомендовано використовувати циркуляційні диспергатори (бачок з мішалкою – трубопроводи – насос – ємнісний датчик вологоміра – трубопроводи), які дозволяють створити потік емульсії через датчик вологоміра.

Для зменшення похибок, зумовлених використанням об'ємних мір місткості, слід зважувати проби. Уводити дистильовану воду у ємність для проби необхідно піпетками другого класу.

Масу «сухої» нафти m_1 , потрібну для виготовлення заданої маси емульсії ($m_2 = 100$ г), визначають за формулою

$$m_1 = \frac{100 - W}{100} m_2,$$

де W – вологість емульсії.

Вологість «сухої» нафти, яку визначають за сертифікатом, враховують за допомогою рівняння

$$m_4 = m_3 (1 - \delta_{wo}/2),$$

де m_4 – фактична маса «сухої» нафти; m_3 – маса, визначена з урахуванням похибки зважування α , тобто $m_3 = m \pm \alpha$; δ_{wo} – залишкова вологість.

Вміст у фактичній масі нафти залишкової води виразимо так:

$$m_5 = m_3 (\delta_w/2).$$

Щоб отримати емульсію з заданою вологістю, потрібно ввести у порцію m_1 таку кількість води:

$$m_6 = \frac{W m_3}{100 - W} - m_5.$$

Загальну масу води в емульсії обчислюють так:

$$m_7 = (m_6 \pm \alpha) + m_5.$$

Порцію нафти m_1 змішують з об'ємом води m_6 за допомогою мішалки ($n = 3200$ хв⁻¹) протягом 10 хв, що забезпечує отримання дисперсних частинок води у нафті розміром 10 мкм.

Розрахунок похибки вологості отриманих емульсій здійснюють так.

1. Обчислюють масу емульсії:

$$M = m_4 + m_7$$

з граничним відхиленням $(\pm \alpha) + (\pm \alpha) = \pm 2\alpha$, тобто

$$M = m_4 + m_7 \pm 2\alpha.$$

2. Знаходять фактичну вологість емульсії, %:

$$W_{\phi} = \frac{m_7 \pm \alpha}{M \pm \alpha} 100,$$

і номінальне значення вологості, %:

$$W = \frac{m_7}{M} 100\%.$$

3. Визначають граничні відносні відхилення маси води δ_{m7} , фактично внесеної у емульсію, повної маси емульсії δ_m , фактичної вологості $\delta_{W\phi}$:

$$\delta_{m7} = \frac{\Delta m_7}{m_7}; \quad \delta_m = \frac{\Delta M}{M}; \quad \delta_{W\phi} = \delta_{m7} - \delta_m.$$

4. Обчислюють абсолютне відхилення вологості $\Delta W = \delta W \cdot W$, тобто вологість знаходиться у межах $W_1 \pm \Delta W$.

5. Визначають відхилення Δ_1, Δ_2 відносно заданої величини: $(W_1 + \Delta W) - W = \Delta_1; (W_1 - \Delta W) - W = \Delta_2$.

6. Обчислюють кінцеве значення вологості $W_2 = W_{-\Delta_2}^{+\Delta_1}$, якою повинна бути атестована штучна емульсія.

3.6 Метрологічне забезпечення приладів для вимірювання вологості твердих і сипких матеріалів

Для твердих матеріалів дотепер немає загальної перевіркової схеми. Розроблені лише окремі зразкові принципи та засоби, які не є універсальними, а призначені лише для конкретних матеріалів або груп

матеріалів. У першу чергу такі принципи були розроблені для зерна різних культур і продуктів його перероблення [16].

Зразковий вакуумно-тепловий принцип побудований на двоступінчастому висушуванні у електричній сушильній шафі. Із зразка зерна відбирають чотири порції по 10 г кожна, які розміщуються у двоярусних бюксах, обладнаних механізмом розмелювання.

Подібні бюкси використані для виключення похибок, зумовлених втратами вологи та сухої речовини при подрібненні та пересуванні порції. Перший етап полягає у висушуванні цілого зерна за температури 105 °С протягом 30 хв. На другій стадії після розмелювання висушеної навіски безпосередньо у бюксі навіски зерна піддаються сушінню у вакуумній сушильній шафі за температури 130 °С, тиску 5...10 мм рт. ст. і при безперервному відкачуванні парів, які виділяються, вакуумним насосом. Температура у зоні навіски підтримується сталою з точністю ± 3 °С.

Гradient температур між окремими гніздами для бюкс на полиці не перевищує 0,5 °С. Вологість визначається за результатами зважування на аналітичних вагах з чутливістю 0,1 мг.

У якості еталонного принципу можна використовувати титрування реактивом Фішера. Екстрактом є метиловий спирт. Оптимальним способом визначення еквівалентної точки виявився електromетричний. Необхідне обладнання являє собою установку для розмелювання зерна, екстракції води та відбирання проби екстракту. Конструкція установки забезпечує виключення втрат води під час здійснення різних операцій. Загальна відносна похибка титрувального принципу складається з похибок виготовлення зразка δ_1 , екстракції води δ_2 і титрування δ_3 :

$$\delta = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2}.$$

Аналіз складових загальної похибки дав такі результати: $\delta = 0,24\%$, що для зерна у діапазоні вологості 8...35% відповідає абсолютній похибці менше 0,1% вологості.

На основі принципу з реактивом Фішера запропоновано перевірочну схему для зернових вологоміврів. Цю схему наведено на рис. 3.19, де зазначено похибки її окремих елементів.

Ще один варіант метрологічної атестації, популярний в останні часи, – використання стандартних зразків. Стандартний зразок – штучний матеріал, який достатньою мірою та з достатньою точністю

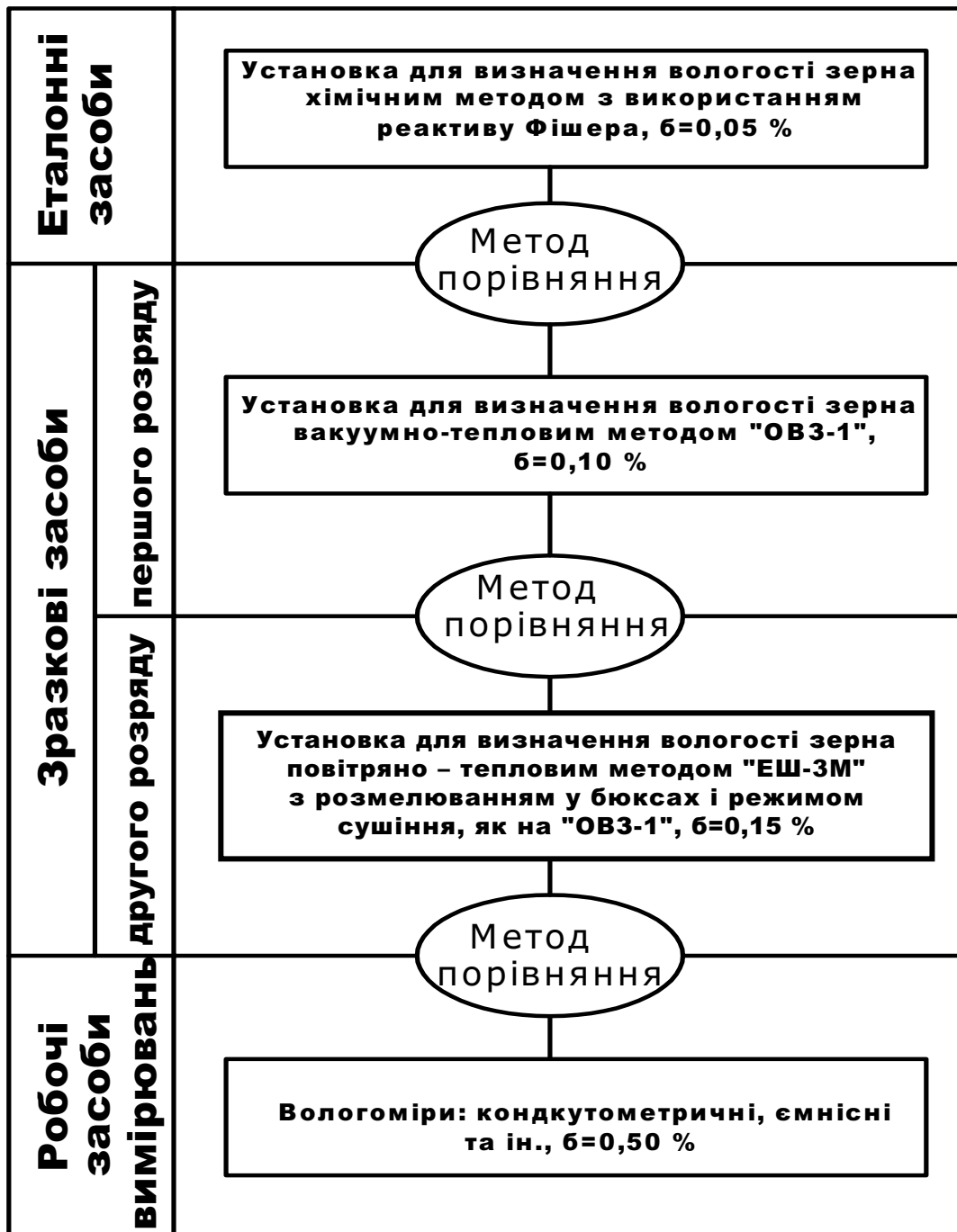


Рисунок 3.19 – Перевірочна схема для вологомірів зерна

імітує потрібні характеристики природного досліджуваного матеріалу. Стандартні зразки виготовляють серійно і на відміну від власноруч виготовлених проб заданої вологості вони можуть зберігатись тривалий час без зміни своїх параметрів. Стандартні зразки імітують порцію досліджуваного матеріалу з заданим значенням вологості.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Беляков В.Л. Автоматизация промышленной подготовки нефти и воды / В.Л. Беляков. – М.: Недра, 1988. – 232 с.
2. Степанов Л.П. Измерение вязкости жидкости / Л.П. Степанов. – Л.: Изд-во стандартов, 1965. – 40 с.
3. ГОСТ 8.025-75 ГСИ. Государственный первичный эталон и поверочная схема для средств измерений кинематической вязкости жидкости; введ. 02.11.1975. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 25 с.
4. Теория и практика экспрессного контроля влажности твердых и жидких материалов / Кричевский Е.С., Бензарь В.К., Венедиктов М.В. и др.; под. общ. ред. Е.С. Кричевского. – М.: Энергия, 1980. – 240 с.
5. А.с. 757958 СССР, МКИ³ G01 N 27/22. Измерительная ячейка диэлькометрического влагомера / А.Ф. Кугаевский, В.Л. Гераськов (СССР). – № 2602580/18-25; заявл. 16.04.78; опубл. 23.08.80, Бюл. № 31. – 3 с.: ил.
6. А.с. 1125530 СССР, МКИ³ G01 N 27/22. Емкостный датчик диэлектрических свойств газообразных и жидких сред / И.Г. Минаев, О.В. Реброва (СССР). – № 3599161/24-25; заявл. 31.05.83; опубл. 23.11.84, Бюл. № 43. – 4 с.: ил.
7. А.с. 1004851 СССР, МКИ³ G01 N 27/22. Емкостный измерительный преобразователь / Э.В. Кузьмин, Ю.В. Бедарев (СССР). – № 3323150/18-25; заявл. 28.07.81; опубл. 15.03.83, Бюл. № 10. – 3 с.: ил.
8. Пат. 62125 Україна, МПК⁷ G01 N27/22. Ємнісний датчик вологості / Заболотний О.В., Заболотний В.А., Кошовий М.Д.; Заявник і патентовласник Нац. аерокосм. ун-т ім. М.Є. Жуковського «ХАІ». – № 20021210070; заявл. 13.12.2002; опубл. 15.12.2003, Бюл. № 12. – 2 с.: іл.
9. ГОСТ 14203-69. Диэлькометрический метод определения влажности; введ 01.01.70. – М.: Изд-во стандартов. – 1969. – 8 с.
10. Бухгольц В.П., Тисевич Э.Г. Емкостные преобразователи в системах автоматического контроля и управления / В.П. Бухгольц, Э.Г. Тисевич. – М.: Энергия, 1972. – 79 с.
11. Заболотний О.В., Кошовий М.Д. Аналіз метрологічних характеристик ємнісного давача вологості нафтопродуктів / О.В. Заболотний, М.Д. Кошовий // Український метрологічний журнал. – 2005. – № 4. – С. 54 – 57.
12. А.с. 1806367 СССР, МКИ³ G01 N 27/22. Электрический датчик влажности / А.И. Хомченко, В.В. Ветров, С.В. Посохова (СССР). –

№ 4859695/25; заявл. 14.08.90; опубл. 30.03.93, Бюл. № 12. – 3 с.: ил.

13. А.с. 949472 СССР, МКИ³ G01 N 27/22. Емкостной датчик влажности почвы / В.Г. Хлыстун (СССР). – № 3235935/18-25; заявл. 14.01.81; опубл. 07.08.02, Бюл. № 29. – 3 с.: ил.

14. А.с. 1695212 СССР, МКИ³ G01 N 27/22. Емкостный датчик влажности сыпучих материалов / Т.Т. Джапаридзе, А.З. Исакадзе, Т.Д. Джапаридзе (СССР). – № 4658650/25; заявл. 20.12.88; опубл. 30.11.91, Бюл. № 44. – 3 с.: ил.

15. Беляков В.Л. Автоматический контроль параметров нефтяных эмульсий: справ. / В.Л. Беляков. – М.: Недра, 1992. – 202 с.

16. Берлинер М.А. Измерение влажности / М.А. Берлинер. – М.: Энергия, 1973. – 400 с.

ЗМІСТ

1	ПРИНЦИПИ ВИМІРЮВАННЯ ГУСТИНИ НАФТИ.....	3
1.1	Вібраційні вимірники густини.....	3
1.4	Засоби повірки вимірників густини.....	9
2	ПРИНЦИПИ ВИМІРЮВАННЯ В'ЯЗКОСТІ.....	14
2.1	Фізичні основи вимірювання в'язкості.....	14
2.2	Класифікація принципів вимірювання в'язкості.....	16
2.3	Капілярний принцип вимірювання в'язкості.....	16
2.4	Похибки капілярних віскозиметрів.....	21
2.5	Ротаційний принцип вимірювання в'язкості.....	28
2.6	Похибки ротаційних віскозиметрів.....	30
2.7	Принцип падаючої кулі.....	32
2.8	Вібраційний принцип вимірювання в'язкості.....	34
2.9	Державний первинний еталон в'язкості.....	36
3	ПРИНЦИПИ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ НАФТОПРОДУКТІВ ТА ТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ.....	40
3.7	Основи теорії високочастотної вологометрії рідин.....	42
3.8.	Первинні вимірювальні перетворювачі вологості нафтопродуктів.....	47
3.9.	Первинні вимірювальні перетворювачі вологості сипких матеріалів.....	65
3.10	Промислові вологоміри нафтопродуктів та сипких матеріалів.....	69
3.11	Метрологічне забезпечення приладів для вимірювання вологості нафтопродуктів.....	72
3.12	Метрологічне забезпечення приладів для вимірювання вологості твердих та сипких матеріалів.....	75
	БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	78

**Заболотний Олександр Віталійович
Світличний Олександр Володимирович**

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ
ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ВЕЛИЧИН.
КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ ТВЕРДИХ І РІДИННИХ РЕЧОВИН**

Частина друга

Редактор С.П. Гевло

Зв. план, 2008

Підписано до друку 04. 06. 2008

Формат 60×84 1/16. Папір офс. № 2. Офс. друк

Ум. друк. арк. 4,5. Обл.-вид. арк. 5,06. Наклад 100 прим.

Замовлення 260. Ціна вільна

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського

“Харківський авіаційний інститут”

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

<http://www.khai.edu>

Видавничий центр “ХАІ”

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

izdat@khai.edu