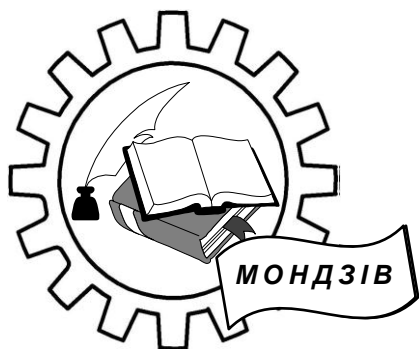


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ ТА КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ



Кафедра обладнання переробних і
харчових виробництв імені професора
Ф.Ю. Ялпачика

**СКЛАДАННЯ, ОФОРМЛЕННЯ І ПОДАЧА ЗАЯВКИ НА
ВИДАЧУ ПАТЕНТА НА ВІНАХІД**

Методичні вказівки до виконання практичної роботи
з дисципліни "Методи дослідження процесів та узагальнення їх
результатів"

Спеціальність 133 "Галузеве машинобудування"
ОС Магістр

**Мелітополь
2018**

Складання, оформлення і подача заявки на видачу патента на винахід. Методичні вказівки для студентів, що навчаються за спеціальністю 133 "Галузеве машинобудування" ОС Магістр - Таврійський державний агротехнологічний університет, 2018 - 21 с.

Розробники: к.т.н., доцент кафедри ОПХВ ім Ф. Ю. Ялпачика
Самойчук К.О.
асистент кафедри ОПХВ ім Ф. Ю. Ялпачика
Ковальов О.О.

Рецензент: к.т.н., доцент, кафедри СГМ

Дядя. В. М.

Розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри ОПХВ

Протокол № _____ від _____ 201 р.

Методичні вказівки затверджені методичною радою факультету ІКТ

Протокол № _____ від _____ 201 р.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ

Тема: Віскозиметрія

Мета: розширити і поглибити знання студентів із сутності, видів, області застосування і методики вимірювання в'язкості.

Час: 2 год.

1.1 Порядок виконання роботи

- представити викладачу виконане завдання для самопідготовки.
- Умову завдання наведено у п. 1.2;
- проробити лабораторну частину;
 - виконати домашнє завдання.

1.2 Завдання для самопідготовки

У процесі підготовки до заняття студент в обов'язковому порядку повинен виконати наступні завдання:

- а) вивчити конспект лекцій;
- б) опрацювати рекомендовану літературу;
- в) занести у зошит для практичних робіт такі матеріали:
 1. Надайте визначення терміну «в'язкість»?
 2. Чи впливає температура на показчики в'язкості?
 3. Які способи визначення в'язкості рідин вам відомі?
 4. Що описує закон Стокса?

1.3 Практична частина

Природа в'язкості

В'язкість (внутрішнє тертя рідини) – називаються сили, тертя між шарами рідини, що рухаються паралельно один одному з різними за величиною швидкостями та напрямлені по дотичній до поверхні зіткнення шарів. Інакше кажучи це величина, що характеризує сили внутрішнього тертя, які виникають при русі газу або рідини. Шар рідини, що рухається швидше діє з прискорюючою силою на сусідній шар, що рухається більш повільно. Кількісно в'язкість характеризує зміну динамічної в'язкості або, інакше кажучи, коефіцієнту внутрішнього тертя.

Величина сили внутрішнього тертя F між сусідніми шарами рідини пропорційна до площі поверхні ΔS та градієнту швидкості dv/dx , що описується рівнянням Ньютона

$$F = \eta \frac{dv}{dx} \Delta S, \quad (1)$$

де F – тангенційна сила, що викликає зсув шарів рухомого тіла, яка спрямована в бік зменшення швидкості (знак мінус у формулі);

$\frac{dv}{dx}$ – показник хуткості зміни швидкості рідини або газу при переході з одного рухомого шару рідини до іншого, що спостерігається при переході в напрямку перпендикулярному до шарів рідини.

Описану залежність також можна виразити у вигляді

$$\frac{dv}{dx} = \left(\frac{v_2 - v_1}{x_2 - x_1} \right), \quad (2)$$

Необхідно розглянути рух кульки з масою m в рідині

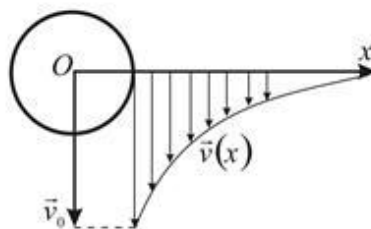


Рисунок 1 – Перемінний градієнт швидкості потоку.

На рисунку 1 показано розподіл швидкостей рідини біля рухомої в ній вертикально донизу зі швидкістю v_0 кульки. Швидкість руху кульки v_0 настільки мала, що завихрення в рідині не утворюються. Тоді швидкості безпосередньо прилягаючої до поверхні кульки дорівнює v_0 . До цього руху частково включаються віддалені від кульки шари рідини. При цьому швидкість найбільш швидко змінюється у напрямку вісі x , поблизу кульки. Наявність градієнту швидкості у поверхні тіла показує, що на нього діє сила внутрішнього тертя, що залежить від коефіцієнту в'язкості η . Сама величина η визначається природою рідини та зазвичай істотно залежить від температури рідини, з її підвищенням вона зменшується.

В'язкість є найважливішою фізико – хімічною характеристикою, що визначає різні стани багатьох речовин. Її враховують при проектуванні та експлуатації трубопроводів і апаратів у яких відбувається рух рідкого або газоподібного середовища. Цю характеристику продукту можна також визначити як здатність речовини чинити опір переміщенню в ньому якого небудь тіла. В'язкість визначає якість багатьох харчових продуктів: сиропів, майонезів, кетчупів. Вона відіграє помітну роль у виробництві багатьох продуктів бо істотно впливає на процеси перемішування, фільтрування, сепарації, гомогенізації. В'язкість харчових продуктів зменшується при підвищенні вологості, температури, жирності та зростає із збільшенням концентрації розчинів та ступеню їх дисперсності. Значення в'язкості необхідно знати, тому що за встановленого режиму руху рідини різні шари рідини мають різні швидкості руху. Найбільше її значення спостерігається в шарі біля центральної частини труби. Шар, безпосередньо прилягаючий до

стінок труби має нижчу швидкість і, отже, нижчу в'язкість.

Існує декілька різновидів в'язкості: динамічна μ , яка визначається як відношення одиниці сили, яка необхідна для зсуву рідини на одиницю відстані до одиниці площі шару рідини; кінематична характеризує текучість масел при нормальних та підвищених температурах. Кінематична в'язкість позначається ν та визначається як відношення динамічного коефіцієнту в'язкості μ до густини ρ рідини. Фізична сутність кінематичної в'язкості в тому, що вона показує здатність речовини під дією сил гравітації чинити опір руху. В'язкість, яка визначається через силу опору руху зветься динамічною в'язкістю. Динамічна в'язкість середовища при ламінарній течії в якій в шарах рідини, що знаходяться на відстані 1м в напрямку перпендикулярному до напрямку течії під дією тиску зсуву 1Па виникає різниця швидкостей течії 1м/с зветься паскалем на секунду. Отже, динамічна в'язкість характеризує текучість рідини в реальних умовах на відміну від кінематичної в'язкості, в різних умовах тобто за різних температур та тисків. Залежність між кінематичною та динамічною в'язкістю виражається залежністю

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}. \quad (3)$$

Одиницями вимірювання динамічної в'язкості в системі СИ є Паскаль·сек, в системі CGS – Пуаз. 1Паскаль-секунда дорівнює 10 Пуазам. Кінематична в'язкість вимірюється в Стоксах або у позасистемних одиницях. 1Стокс дорівнює $10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}$. Зворотна до в'язкості величина зветься текучістю

$$j = \frac{1}{\eta}. \quad (4)$$

Методи і пристрої для вимірювання в'язкості рідини

Для вимірювання в'язкості рідини існує багато пристроїв які звуть віскозиметрами. За сферою призначення вони можуть бути поділені на віскозиметри для малої та середньої в'язкості, віскозиметри для рідини з високою в'язкістю та прилади в яких одночасно вимірюють в'язкість, напруження зсуву та інші механічні властивості рідин. Класичним способом вимірювання в'язкості – визначення часу за який рідина певного об'єму під дією різниці тисків або тільки сили гравітації протікає крізь калібрований отвір. До теперішнього часу найбільшого розповсюдження набули наступні методи вимірювання в'язкості:

- капілярний метод Хаген – Пуазейля (дослідження об'єму рідини, що витікає з трубки радіусом R довжиною l. Метод заснований на рівнянні Пуазейля, яке пов'язує швидкість з якою рідина витікає крізь капіляр з часом за який це відбувається;
- метод падаючого тіла (метод Стокса) у в'язкому середовищі. Заснований на базі закону Стокса метод пов'язує коефіцієнт

в'язкості рідини зі швидкістю поступового руху металевої кульки в ній, наприклад віскозиметр Гепплера;

- метод взаємодії між рухомим та нерухомим тілами. Даний метод був запропонований Ньютоном та доповнений Тейлором. Ньютон зсовував пластини з рідиною між ними та по геометричним розмірам пластин, силі та швидкості зсуву обчислював внутрішнє тертя рідини. А Тейлор визначав в'язкість прошарку за крутним моментом або швидкістю обертання одного циліндру в іншому;
- вібраційний метод який полягає в визначенні в'язкості за швидкістю згасання пружних коливань в зонді – пластині, що поміщена в досліджуване середовище. Наприклад визначення в'язкості агресивних середовищ та розплавів, безперервний контроль внутрішнього тертя під час технологічних процесів.

Динамічну в'язкість рідин вимірюють ротаційними віскозиметрами, які зручні для досліджень матеріалів з високою в'язкістю такі як полімери та розплавлені бітуми. Існує декілька конструкцій таких віскозиметрів. В однієї з них досліджувана рідина поміщується в простір між двома коаксіальними циліндрами, з яких зовнішній циліндр є нерухомим, а внутрішній обертається навколо вертикальної вісі або з постійною частотою або з уповільненням після відключення двигуна, який привів його до руху. В'язкість визначається за витратою потужності, що необхідна для обертання або за ступенем уповільнення рухомого циліндру.

Для безперервного вимірювання динамічної в'язкості невеликих об'ємів рідини (до 5 см³) застосовують вібраційні віскозиметри принцип дії яких заснований на визначенні часу затухання ультразвукових коливань.

Для визначення в'язкості рідин існує багато приборів. За сферою застосування вони можуть бути поділені на

- віскозиметри для рідин з низькою та середньою в'язкістю;
- прибори для вимірювання рідин із високою в'язкістю;
- прибори в яких одночасно вимірюється в'язкість, напруження зсуву та інші показники механічних властивостей дисперсних систем. Останні прибори звуть пластометрами, еластовіскозиметрами та пластовіскозиметрами.

Види віскозиметрів:

- капілярні віскозиметри,
- ротаційні віскозиметри,
- віскозиметри з падаючою кулькою,
- віскозиметр з рухомою кулькою,
- віскозиметри з вібруючим зондом,
- віскозиметри пухирцевого типу,
- віскозиметри Гепплера,
- віскозиметри Брукфільда,
- чашкові віскозиметри,
- ультразвукові віскозиметри.

Менш часто ніж інші види застосовуються віскозиметри пухирцевого

типу при якому внутрішнє тертя оцінюється за показниками руху пухирцю газу, що вільно плаває в досліджуваному середовищі або чашкові віскозиметри. Чашкові віскозиметри (рисунк 2) являють собою прибори для вимірювання в'язкості рідких середовищ, що виконані в формі воронки або чашки та використовуючі капілярний метод віскозиметрії.



Рисунок 2 – Чашковий віскозиметр.

На практиці часто застосовують не абсолютні а відносні методи визначення в'язкості, що може виключити з розрахунків константи приборів. Вимірюють наприклад час падіння кульки, час витікання рідини крізь отвір або інші параметри для стандартної рідини а після для досліджуваної рідини. Оскільки значення в'язкості пропорційні до вимірюваних величин, то, знаючи в'язкість стандартної рідини можна обчислити в'язкість досліджуваної.

Умовна в'язкість це відношення динамічних в'язкостей розчину й чистого розчиннику. Одним з широко використовуваних приборів для вимірювання умовної в'язкості є віскозиметр Енглера, в якому вимірюється швидкість витікання 200 мл рідини порівняна з часом витікання 200 мл води крізь отвір того ж діаметру та довжини. В'язкість вимірюється в градусах Енглера, що відповідає відношенню часу витікання рідини до швидкості витікання води за тих же умов. Співвідношення між Пуазами та градусами Енглера виражається формулою, що визначає динамічну в'язкість рідини

$$\mu^{(\text{і вісє})} = (0,0731^\circ \text{А} - \frac{0,0631}{^\circ \text{А}}) \rho_0 \quad (5)$$

де ρ_0 – густина рідини; г/см³.

Капілярний метод віскозиметрії

Капілярні принцип вимірювання в'язкості використовується в віскозиметрах багатьох конструкцій. Зазвичай схема вимірювання передбачає наявність дозуючих пристроїв для забезпечення постійних витрат середовища крізь капіляр віскозиметру; вимірювання перепаду тисків на його кінцях та відповідне перетворення результатів з виводом отриманих свідчень в'язкості на шкалу показнику або реєструючого пристрою. Рівняння гідродинаміки для стаціонарної течії рідини з в'язкістю з крізь капіляр

віскозиметра має вигляд

$$Q = \pi R^4 \Delta p / \eta L \Rightarrow \eta = \pi R^4 \Delta p / 8QL, \quad (6)$$

де Q – кількість рідини, що проходить крізь капіляр капілярного віскозиметру в одиницю часу, $\text{м}^3/\text{с}$;

R – радіус капіляру віскозиметру, м

L – довжина капіляру віскозиметру, м ;

η – в'язкість рідини, $\text{Па} \cdot \text{с}$;

Δp – різниця тисків на кінцях капіляру віскозиметру, Па .

Формула Пуазейля справедлива тільки для ламінарного потоку рідини, тобто при відсутності ковзання на границі розділу рідина – стінка капіляру віскозиметру. Наведене рівняння (6) використовують для визначення динамічної в'язкості.

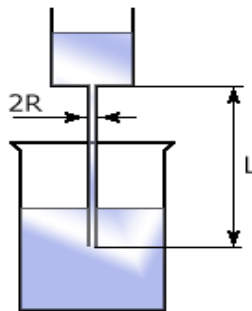


Рисунок 3 – Капілярний віскозиметр.

В капілярному віскозиметрі рідина з однієї ємності під впливом різниці тисків p витікає крізь капіляр перетину $2R$ довжиною L в іншу ємність. З рисунку 3 наочно видно, що обидві ємності мають в багато разів більший поперечний перетин, ніж капіляр віскозиметру, відповідно до цього факту швидкість руху рідини в обох ємностях в N разів менше ніж в капілярі віскозиметру. Таким чином лише частина тиску буде витрачатись на подолання в'язкого опору рідини, інша частина тиску буде витрачатись на надання рідини невизначеної кінетичної енергії для врахування чого до рівняння Пуазейля необхідно вводити поправку Хагенбаха. Слід враховувати, що при вимірюванні в'язкості органічних рідин з великою кінематичною в'язкістю поправка Хагенбаха є незначною та складає частки проценту. Якщо розглядати високотемпературні віскозиметри, то, внаслідок невеликої кінематичної в'язкості рідких металів поправка може складати до 15%. Другу поправку умовно можна позначити як поправку впливу початкової ділянки капіляру віскозиметру на характер руху досліджуваної рідини. Вона буде характеризувати можливе виникнення завихрювання в місці контакту капіляру з резервуаром віскозиметру на початковій ділянці течії

$$\eta = (\pi R^4 \Delta p / 8QL) - (hQ\rho_0 / 8\pi), \quad (7)$$

де h – коефіцієнт, приблизно дорівнює одиниці.

Метод капілярної віскозиметрії можна віднести до точних методів

віскозиметрії, враховуючи те, що відносна похибка вимірювань складає частки проценту, в залежності від добирання матеріалів віскозиметру та точності відліку часу а також інших параметрів що беруть участь в капілярному витіканні. Капілярні віскозиметри вимірюють в'язкість рідин в діапазоні від 1 до 800 мм²/с. До приборів які визначають в'язкість за капілярним методом відносять віскозиметри Оствальда (рисунок 4), чашкові віскозиметри та інші конструкції. У віскозиметрах з постійною витратою вимірюється перепад тисків між кінцями капіляру, в пристрої з постійним тиском – витрата рідини. При застосуванні капілярних віскозиметрів слід ретельно промивати та просушувати його, оскільки навіть незначне забруднення капіляра буде суттєво позначатись на результатах вимірів.

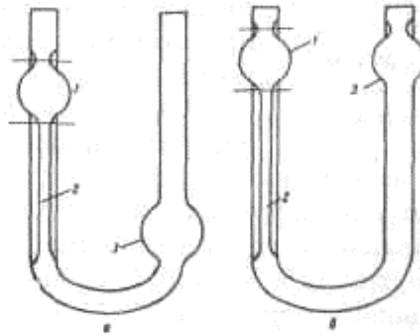


Рисунок 4 – а) віскозиметром Оствальда; б) віскозиметр Убеллоде.

1 – ємність для вимірювання кількості рідини, що проходить крізь капіляр; 2 – капіляр; 3 – ємність для збирання рідини.

Метод падаючої кульки віскозиметрії

Метод падаючої кульки віскозиметрії заснований на законі Стокса, згідно якого швидкість вільного падіння твердої кульки у в'язкому необмеженому середовищі описується наступним рівнянням

$$v = 2(\rho - \rho_0)r^2g/9\eta, \quad (7)$$

де v – швидкість поступового рівномірного руху кульки;

r – радіус кульки;

g – прискорення вільного падіння;

ρ – густина матеріалу кульки.

Слід відзначити, що рівняння є достовірним тільки в тому випадку, якщо швидкість падіння кульки віскозиметру вельми незначна та виконується знайдена емпіричним шляхом умова: $r \leq 0,6\eta/dv$.

При русі кульки в заповненою рідиною ємності, розміри якої значно більші за розміри кульки, шари рідини, які знаходяться близько від кульки рухаються з її швидкістю (рисунок 5).

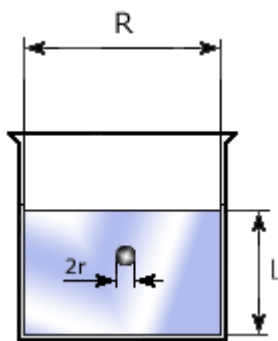


Рисунок 5 – Вимірювання в'язкості за методом падаючої кульки віскозиметрії.

Сусідні шари рідини рухаються з меншими швидкостями та, відповідно, між шарами рідини виникає сила внутрішнього тертя. Стокс, вивчаючи процес довів, що ця сила при незначних величинах швидкості пропорційна до швидкості руху кульки та його радіусу. Як в капілярному віскозиметрі, необхідно враховувати поправки на кінцеві розміри циліндричної ємності віскозиметру з падаючою кулькою (висотою L та радіусом R , за умови, якщо виконується співвідношення $r/R < 0.1$). Отже, рівняння для визначення динамічної в'язкості шляхом падаючої кульки віскозиметрії

$$\eta = \frac{2r^2(\rho - \rho_0)g}{9V(1 + 2,4r/R)(1 + 3,3r/L)} \quad (8)$$

Віскозиметри з падаючою кулькою застосовуються в фармацевтичній, харчовій, нафтохімічній галузях промисловості для точного оцінювання внутрішнього тертя прозорих рідин та газів низької в'язкості. Похибка вимірювань складає 1 – 3%. На базі методу створено багато моделей високотемпературних віскозиметрів, в яких вимірюється в'язкість розплавлених стекел та солей. Головним напрямом модернізації даних приборів – застосування більш досконалих способів фіксації часу падіння кульки.

При русі тіла в в'язкому середовищі виникає опір руху. Природа цього опору двояка. За невеликих швидкостей, коли за тілом немає вихорів, сила опору обумовлена в'язкістю рідини. Між шарами виникає сила тертя. Згідно закону Стокса сила опору дорівнює

$$F_{\text{до}} = 6\pi r\eta v, \quad (9)$$

де r – радіус кульки,

v – швидкість руху кульки.

Другий механізм сил опору пов'язаний з утворенням вихорів. Частина роботи, яка здійснюється при русі тіла в рідині, йде на утворення вихорів, енергія яких перетворюється на тепло. Метод Стокса дозволяє визначити з.

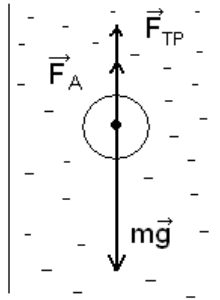


Рисунок 6 – Сили, що діють на кульку при русі в рідині.

При русі в рідині на тіло діють три сили (рисунок 6). Перша сила – вага кульки визначається як

$$mg = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho g \quad (10)$$

друга – сила Архімеду

$$F_A = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_0 g \quad (11)$$

та сила тертя (9).

Перша та друга сили є постійними за величиною, третя – пропорційна до швидкості руху кульки. При русі кульки в рідині настає мить, коли всі три сили зрівнюються, та кулька починає рухатись рівномірно. Умова рівномірного руху кульки записується як

$$mg = F_A + F_G \quad (12)$$

Зробивши перетворення обчислюємо з за формулою

$$\eta = \frac{2}{9} g r^2 \frac{(\rho - \rho_0)}{v} \quad (13)$$

Дія віскозиметру Гепплера (рисунок 7) заснована на законі Стокса. В'язкість визначається часом проходження кулькою певної відстані, частіше всього під дією власної ваги.



Рисунок 7 – Віскозиметр Гепплера.

Вібраційний метод віскозиметрії

Вібраційний метод віскозиметрії базується на визначенні зміни параметрів вимушених коливань тіла вірної геометричної форми, що зветься зондом вібраційного віскозиметру при зануренні його в досліджувану рідину або розплав (рисунок 8). В'язкість досліджуваного середовища визначається по значенням цих параметрів для чого зазвичай використовується градуювальна крива віскозиметру.

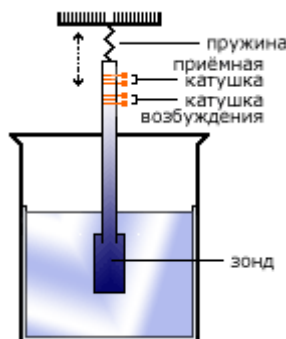


Рисунок 8 – Схема вібраційного віскозиметру

Створення низькочастотних вібраційних віскозиметрів можливе на двох принципах:

- при постійній амплітуді гармонічного зусилля, що збуджує коливання вимірюють амплітуду коливань чуттєвого елементу в в'язкому середовищі;
- вимірюють амплітуду збуджуючого зусилля, яке необхідне для підтримання заданої амплітуди коливань чуттєвого елементу в контрольованому середовищі.

Частотно – фазовий варіант вібраційного методу віскозиметрії використовують для рідин з високою в'язкістю. В цьому випадку вимірюється частота коливання зонду віскозиметру спочатку не зануреного (ω_0) а потім зануреного (ω) в рідину при сдвигу фаз $\varphi = \pi/2$.

Для вимірювання в'язкості середовищ з меншою в'язкістю, наприклад металічних розплавів найбільш доцільним є використання амплітудно – резонансного методу вібраційної віскозиметрії. В цьому випадку шляхом підбору частот коливань прагнуть того, щоб амплітуда коливань A була максимальною. Тому, вимірюваним параметром за яким визначається в'язкість стає амплітуда коливань зонду віскозиметру. Градування віскозиметру здійснюється за відомими рідинами, зокрема, визначаються постійні C_1 та C_2 . Враховуючи поправки C_2 до яких відносять сторонні сили тертя, поверхневого натягу та лобового опору маємо кінцеву формулу методу вібраційної віскозиметрії

$$\sqrt{\mu\rho} = \tilde{N}_1 / A - \tilde{N}_2. \quad (14)$$

Вібраційний віскозиметр має значно більшу, порівняно з ротаційними віскозиметрами чуттєвість та може бути застосований для середовищ з температурою до 2000 °С в інертній атмосфері або вакуумі. Відносна

похибка вимірів при застосуванні данного типу віскозиметрів складає $\pm 0,5-1\%$. При роботі з розплавами в інтервалі температур $700-1900\text{ }^{\circ}\text{C}$ загальна похибка віскозиметру зростає та може скласти $\pm 3-5\%$.

Вібраційні віскозиметри типу ВВП володіють здатністю реагувати на неоднорідність структури середовища, розташованого поблизу від чуттєвого елементу прибору. Ця здатність дозволяє застосовувати вібраційні віскозиметри для вирішення нових задач, таких як проведення оперативного контролю за процесом желеутворення, контролю за швидкістю переходу в'язких емульсій до розчиненого стану та інших.

На базі вібраційного методу вимірювання в'язкості створений віскозиметр з вібруючим зондом (рисунок 9), принцип дії якого оснований на вимірюванні характеристик коливань зануреної в рідину системи, що збуджується за допомогою електромагнітних сил. Амплітуда вимушених коливань датчику, зануреного в рідину залежить від в'язкості середовища. Вимірюють резонансну амплітуду коливань при постійній збуджуючій силі, або визначають частоту коливань зануреної та незануреної до рідини частин приладу при відомому значенні зсуву фаз між збуджуючою силою та коливаннями системи.



Рисунок 9 – Віскозиметр вібраційний SV-100

Ротаційний метод віскозиметрії

Ротаційний метод віскозиметрії полягає в тому, що досліджувана рідина поміщується в зазор між двома співосними тілами правильної геометричної форми (циліндри, конуси, сфери), необхідний для зсуву досліджуваного середовища. Два тіла обертання однакових або різних совміщаються по вісях таким чином, що одне з них торкається іншого зсередини, наприклад сфера вписана в конус. Простір між тілами заповнений досліджуваною рідиною. До одного з тіл подається крутний момент, тіло починає обертатись з деякою кутовою швидкістю що залежить від в'язкості речовини (у віскозиметрів, як правило, стабілізується швидкість обертання та вимірюється крутний момент). Одне з тіл на протязі всього вимірювання лишається нерухомим, інше, що зветься ротором ротаційного віскозиметру здійснює обертання з постійною швидкістю. У якості ротору може виступати

як внутрішнє так і зовнішнє тіло віскозиметру. Наочно, що обертовий рух ротору віскозиметру передається до іншої поверхні, шляхом руху в'язкого середовища за відсутності ковзання. Звідси виходить наступний тезис: момент обертання ротору ротаційного віскозиметру є мірою в'язкості рідини.

Розглянемо інверсну модель ротаційного віскозиметру в якому буде обертатись зовнішнє тіло, внутрішнє лишається нерухомим та йому передається момент обертання (рисунок 9).

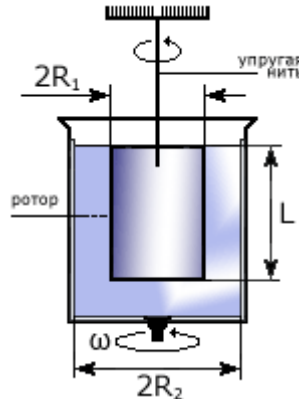


Рисунок 9 – Інверсна модель ротаційного віскозиметру

R_1, L – радіус та довжина (нерухомого) ротору ротаційного віскозиметру;

ω – постійна кутова швидкість обертання зовнішнього тіла;

R_2 – радіус обертаючогося резервуару ротаційного віскозиметру.

Знаходячи значення моментів обертання рухомої та нерухомої частин віскозиметру, зробивши перетворення та виразивши відносно з маємо

$$\eta = \frac{(R_2^2 - R_1^2) \pi d^2 G \varphi}{4 \pi L R_1^2 R_2^2 32 l \omega}, \quad (15)$$

де d – діаметр пружної нитки;

l – довжина пружної нитки;

φ – кут, на який закручується нерухомо закріплена нитка;

G – момент пружності матеріалу нитки.

Або виразити у вигляді

$$\eta = \frac{k \varphi}{\omega}. \quad (16)$$

де k – постійна ротаційного віскозиметру.

Якщо розглядати аналогічну задачу для ротаційного віскозиметру з обертаючимся внутрішнім ротором віскозиметру та нерухомим зовнішнім корпусом виражається формулою

$$\eta = \frac{(R_2^2 - R_1^2) G_\delta}{8 \pi^2 L R_1^2 R_2^2 L}. \quad (17)$$

Або

$$\eta = (k G_\delta) / L, \quad (18)$$

де G_0 – момент, необхідний для підтримання постійної частоти обертання.

Зараз найбільш розповсюдженими є електроротаційні віскозиметри (рисунок 10) в яких внутрішній циліндр занурений до в'язкого середовища приводиться до руху електродвигуном. Обертаючись з постійною швидкістю ротор віскозиметру при зануренні в рідину або розплав зустрічає опір рівномірному обертотому руху, отже, на валу двигуна виникає гальмуючий момент прямо пропорційний до в'язкості середовища, що викликає зміну електричних характеристик двигуна, що реєструється спостерігачем.



Рисунок 10 – Електроротаційний віскозиметр

Діапазон роботи стандартних віскозиметрів лежить в діапазоні від 1 мПа·с до сотень тисяч Па·с. Ротаційні віскозиметри використовують для вимірювання в'язкості середовищ при температурах від -60°C (масла) до $+2000^{\circ}\text{C}$ (розплави металів та сілікатів) та дозволяють вести вимірювання з похибкою в межах $\pm 3-5\%$.

Сутність методу при визначенні в'язкості полягає в вимірюванні крутного моменту при заданій кутовій швидкості або по кутовій швидкості при заданному крутному моменті. Для цих цілей ротаційний віскозиметр обладнаний динамометричним пристроєм. Пристрої, що застосовуються в віскозиметрах для вимірювання моментів та кутових швидкостей поділяють на механічні та електричні. Подальші розрахунки ведуться на базі теорії методу ротаційної віскозиметрії.

Ультразвукові віскозиметри

Віскозиметри, дія яких заснована на ультразвуковому методі не відносяться до класу пристроїв з широким діапазоном вимірювання. До класу високотемпературних віскозиметрів вони також не відносяться, зважаючи на відносну похибку, що виникає при високотемпературній віскозиметрії та властивостей матеріалів пристрою. Такі пристрої використовуються для вимірювання динамічної в'язкості. Завдяки записуючому пристрою, вони можуть бути використані для безпосереднього контролю в'язких рідин безпосередньо в технологічних потоках.

Принцип дії ультразвукових віскозиметрів (рисунок 11) заснований на

вимірюванні швидкості згасання коливань в пластині з магнітострикційного матеріалу зануреної до досліджуваного середовища. Коливання виникають від коротких (тривалість 20 ± 10 мксек) імпульсів тока в котушці, яка намотана на пластину. У відповідності до закону збереження при коливанні пластини в котушці наводиться ЕРС, яка зменшується зі швидкістю що залежить від в'язкості досліджуваного середовища. При зменшенні ЕРС до деякого граничного значення до котушки надходить новий імпульс, який збуджує коливання. В'язкість середовища визначається за частотою виникнення імпульсів, тобто за мірою згасання коливань пластини. Ультразвуковими віскозиметрами вимірюють в'язкість в діапазоні від 10 до $500 \text{ Н} \cdot \text{сек} / \text{м}^2$ з відносною похибкою 5%.

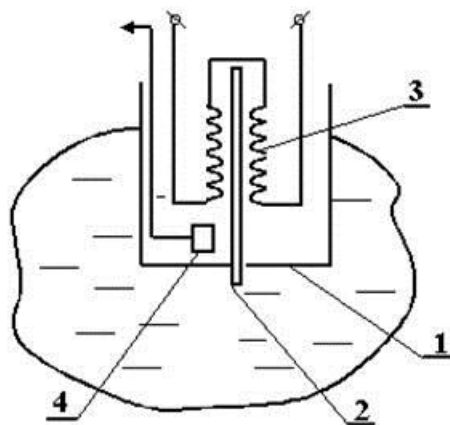


Рисунок 11 – Ультразвуковий віскозиметр

1 – мембрана; 2 – пластина; 3 – котушка збудження; 4 – датчик.

1.4 Порядок виконання роботи

1.4.1 Обладнання робочого місця

- 1.Віскозиметр Оствальда;
- 2.Кювети з розчинами;
- 3.Мікрометр;
- 4.Секундомір;
- 5.Мірна мензурка;
- 6.Набір кульок різного діаметру;
- 7.Лінійка вимірювальна;
- 8.Модель віскозиметру Гепплера.

1.4.2 Визначення в'язкості за методом падаючої кульки віскозиметрії

Пристрій для визначення в'язкості складається з широкого скляного циліндру 1 (рисунок 12) з нанесеними на нього двома кільцевими горизонтальними мітками (3 та 4) з відстанню l між мітками.

Порядок виконання роботи

1.Циліндр наповнюється досліджуваною рідиною (вершки, сік,рослинна олія) так, щоб рівень рідини був на 5 – 8 см вище верхньої позначки.

2.Діаметр кульки визначаємо мікрометром 7. Для вимірювання коефіцієнту внутрішнього тертя масла беруть кульки дуже малого діаметру з ємності 5.

3.Повільно опускаємо кульку ваги m_1 в циліндр, відмічаємо за секундоміром 6 час проходження відстані між мітками, яка потрібна для подальшого визначення швидкості кульки.

4.Дослід проводити 3 – 5 разів. Для кульок іншої ваги провести аналогічні виміри. Дані по кожному виду рідини занести до таблиці (1) та використовуючи середнє значення з трьох дослідів визначити динамічну в'язкість за формулою (13). Розрахувати значення кінематичної в'язкості використовуючи формулу (3).

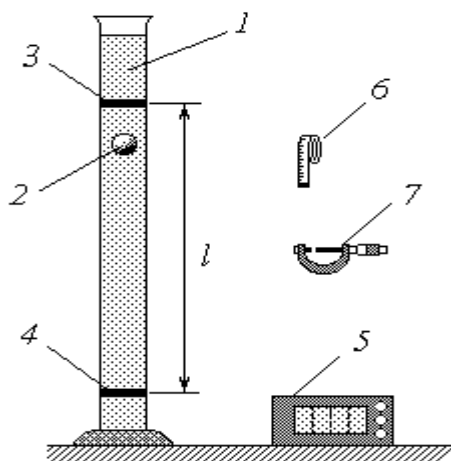


Рисунок 12 – Лабораторний пристрій для вимірювання в'язкості за методом падаючої кульки віскозиметрії.

Таблиця 1 – Результати вимірювань в'язкості за методом падаючої кульки для (молока, соку, рослинної олії) при $L =$ м.

Найменування рідини	№ досліду	Діаметр кульки $d, \text{м}$	Густина рідини $\rho_0, \text{кг/м}^3$	Густина кульки $\rho, \text{кг/м}^3$	Час падіння кульки $t, \text{с}$	Назва з, Па·с	Назва н, Ст
Рідина 1	1						
	2						
	3						
Рідина 2							
Рідина 3							

Проаналізувати отримані дані.Зробити висновки щодо точності вимірювання в'язкості методом падаючої кульки.

1.4.3 Визначення в'язкості за методом капілярної віскозиметрії

Порядок виконання роботи

1.Для заповнення віскозиметра на відвідний патрубок 3 (рис.13) надівають гумовий шланг.

2.Далі, затиснувши пальцем коліно 2 і перевернувши віскозиметр, опускають коліно 1 в судину з рідиною і засмоктують її за допомогою груші до відмітки 2 стежачи за тим, аби в рідині не утворювалися бульбашки повітря.

3.Потім віскозиметр повертають в нормальне положення. Знімають із зовнішнього кінця коліна 1 надлишок рідини.

4.Встановлюють віскозиметр на штативі.

5.Якщо в цьому є необхідність, засмоктують рідину в коліно 1 приблизно до однієї третини висоти розширення 5.

6.З'єднують коліно 1 з атмосферою і визначають час витікання опускання менісків рідини від відмітки 2 до відмітки 1.

В'язкість обчислюється за формулою (7) за середнім з трьох вимірів часу витікання рідини при фіксованих значеннях температури.

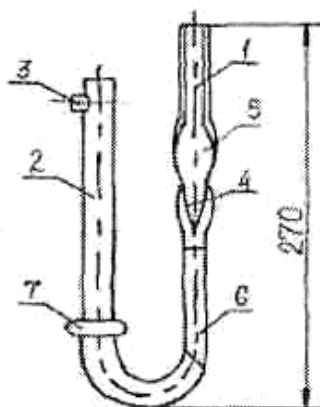


Рисунок 13 – Лабораторний пристрій для вимірювання в'язкості капілярним методом

1 – робоче коліно; 2 – допоміжне коліно; 3 – відвідний патрубок; 4,5 – розширення робочого коліна; 6 – капіляр; 7 – розширення допоміжного коліна.

Таблиця 2 – Результати вимірювань в'язкості за методом капілярної віскозиметрії для (молока, соку, рослинної олії).

Найменування рідини	№ досліду	Густина рідини, кг/м ³	Діаметр кульки, м	Середній час витікання, с	Кінематична в'язкість з, Па·с
Рідина 1	1				
	2				
	3				
Рідина 2					
Рідина 3					

Проаналізувати отримані дані. Зробити висновки щодо точності вимірювання в'язкості методом капілярної віскозиметрії.

Зробити висновки про особливості застосування кожного методу вимірювання для визначення в'язкості, які використовувались в лабораторних установках. Зробити висновки щодо точності вимірювань різних методів.

1.5 Контрольні питання

- 1) За яких умов кулька буде рухатись в рідині рівномірно?
- 2) Які сили діють на кульку, яка падає в об'ємі рідини?
- 3) Сформулюйте закон Стокса?
- 4) Поясніть фізичну сутність коефіцієнту в'язкості?
- 5) Які умови повинні виконуватись для вимірювання в'язкості за методом Стокса?
- 6) Чи залежить в'язкість від температури речовини?
- 7) Чому шлях, який проходить кулька відрховують не від поверхні рідини?
- 8) В якому тепловому стані доцільніше транспортувати рідину по трубах в гарячому чи холодному? Поясніть відповідь.
- 9) Від чого залежить в'язкість рідини?

Рекомендована література

1. Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкостей./ Я. И. Френкель — Л.: «Наука», 1975, 592 с.
2. Динамическая и кинематическая вязкость жидкостей — обзор методов и единиц измерения вязкости.
3. Гершензон Е.М. Молекулярная физика./Е.М. Гершензон, Н.Н. Малов, А.Н. Мансуров.- М.: «Академия», 2000. - 272 с
4. Квасников И. А. Молекулярная физика./И.А.Квасников - М.: Едиториал УРСС, 2011. — 230с.

Додаток А
(довідковий)

Таблиця А1 – В'язкості типових речовин

Рідина	t , °С	μ , П	η , Ст
Бензин	15	0,0065	0,0093
Гліцерин			
50% водний розчин	20	0,0603	0,0598
86% водний розчин	20	1,2970	1,0590
Безводний	20	14,990	11,890
Гас	15	0,0217	0,0270
Мазут	18	38,700	20,000
Незбиране молоко	20	0,0183	0,0174
Нафта:			
легка	18	0,178	0,250
важка	18	1,284	1,400
Патока	18	888	600
Ртуть	15	0,0154	0,0011
Скипидар	16	0,0160	0,0183
Спирт етиловий	20	0,0119	0,0154
Ефір	20	0,0246	0,0033