

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка  
ФІЗИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**М.М. ЛАЗАРЕНКО, Ю.Ф. ЗАБАШТА, К.В. ЧЕРЕВКО,  
А.В. БРИТАН, А.М. ГРИГОР'ЄВ, С.П. СЕНЧУРОВ,  
С.А. БУР'ЯН, Ю.С. ГОЛИК, Д.П. БАСАНЬКО**

# **МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕОЛОГІЧНИХ ТА ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕДИКО-БІОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ**

**Навчально-методичний посібник  
(лабораторний практикум для студентів фізичного факультету  
зі спеціалізацій "Молекулярна фізика",  
"Фундаментальна медична фізика")**

**Київ –2025**

**УДК 532.13:532.135:532.137:532.14⇒531.756**

Рецензенти:

д-р фіз.-мат. наук, проф. *В.В. Клепо*

д-р фіз.-мат. наук, ст. досл. *І.Ю.Дорошенко*

*Рекомендовано до друку Вченою радою фізичного факультету  
Київського національного університету імені Тараса Шевченка  
квітня 2025 року)*

Колектив авторів:

М.М. Лазаренко, Ю.Ф. Забашта, К.В. Черевко, А.В. Британ, А.М. Григор'єв,  
С.П. Сенчуров, С.А. Бур'ян, Ю.С. Голик, Д.П. Басанько

*За загальною редакцією*

*доктора фізико-математичних наук, професора  
Д.А. Гаврюшенка*

**Методи** дослідження реологічних та теплофізичних властивостей медико-біологічних систем: Навчально-методичний посібник / М.М. Лазаренко, Ю.Ф. Забашта, К.В. Черевко, та ін.; за заг. ред. Д.А. Гаврюшенка. - КНУ імені Тараса Шевченка, 2025. – 75 с.

У навчально-методичному посібнику наведено опис лабораторних робіт до курсів «Основи реології», «Реології біосистем» та «Теплофізика медико-біологічних систем» для студентів спеціальності 104 Фізика та астрономія освітнього рівня Бакалавр. Представлені в цьому посібнику лабораторні роботи присвячені методам визначення температури, теплоти та температури плавлення тіл, температурних залежностей густини, в'язкості та теплоємності медико-біологічних рідинних систем.

Навчально-методичний посібник адресовано студентам та аспірантам природничих спеціальностей університетів.

**УДК 532.13:532.135:  
532.137:532.14⇒531.756**

© М.М. Лазаренко, Ю.Ф. Забашта, К.В. Черевко,  
А.В. Британ, А.М. Григор'єв, С.П. Сенчуров,  
С.А. Бур'ян, Ю.С. Голик, Д.П. Басанько, 2025

## **ЗМІСТ**

<b>ПЕРЕДМОВА.....</b>	<b>4</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>6</b>
<b>Лабораторна робота №1</b> Визначення густини твердих тіл та рідин методом гідростатичного зважування. ....	9
<b>Лабораторна робота №2</b> Визначення температурної залежності густини рідин флотаційним методом. ....	17
<b>Лабораторна робота №3</b> Визначення в'язкості рідинних систем віскозиметром Гесса. ....	22
<b>Лабораторна робота № 4</b> Вимірювання в'язкості рідини ротаційним віскозиметром ВСН-3. ....	28
<b>Лабораторна робота № 5</b> Визначення в'язкості консистентних мастил ротаційним віскозиметром РВ-4. ....	33
<b>Лабораторна робота № 6</b> Визначення в'язкості мастил ротаційним віскозиметром РВ-8 ....	41
<b>Лабораторна робота № 7</b> Дослідження температурної залежності в'язкості рідинних систем за допомогою ротаційного віскозиметра ViscoQC 100. ....	46
<b>Лабораторна робота № 8</b> Вимірювання температури термоелектричним методом та термометром опору. ....	52
<b>Лабораторна робота № 9</b> Визначення теплоти плавлення біополімерів, що кристалізуються.	59
<b>Лабораторна робота № 10</b> Визначення теплоємності медико-біологічних систем в широкому інтервалі температур. ....	64
<b>РЕКОМЕНДОВАНІ ДЖЕРЕЛА.....</b>	<b>75</b>

## ПЕРЕДМОВА

Навчально-методичний посібник з лабораторного практикуму призначений для підготовки та проведення лабораторних занять. Він складений відповідно до чинних навчальних програм до курсів «Основи реології», «Реології біосистем» та «Теплофізика медико-біологічних систем» для студентів фізичного факультету зі спеціальності «Фізика та астрономія» ОП Бакалавр СВБ "Молекулярна фізика", "Фундаментальна медична фізика".

### ***Рекомендації студентам під час виконання робіт практикуму у лабораторії***

Опис лабораторних робіт, який надано у цьому посібнику, є лише стислим викладенням змісту експериментальних робіт, які має виконати та засвоїти студент під час вивчення курсів «Реології біосистем», «Основи реології» та «Теплофізика медико-біологічних систем». Тому перед виконанням лабораторної роботи студенту слід опрацювати теоретичний матеріал за підручниками, посилання на які подано у списку літератури.

Студент допускається до виконання лабораторної роботи тільки після того, як він відповість на запитання викладача, які стосуються мети роботи, основних теоретичних відомостей за темою роботи, методики вимірювань тощо. Перед виконанням завдань лабораторної роботи треба докладно ознайомитись з будовою та інструкціями приладів та обладнання, що використовується під час виконання роботи. Не слід шкодувати часу на попередню стадію, вважаючи, що на вимірювання не вистачить часу. Саме це сприяє набуттю експериментальних навичок.

На початку виконання лабораторної роботи студент має провести контрольний дослід, зі необхідності оцінити інструментальні похибки вимірів, після чого можна починати детальні вимірювання фізичних величин. Виконання вимірів необхідно виконувати вдумливо, не поспішаючи, з максимально можливою для конкретних приладів точністю, при цьому розумно узгоджуючи між собою точності виміру різних величин у даній роботі.

Під час обробки отриманих результатів експерименту проміжні обчислення слід виконувати з точністю, яка дещо перевищує точність вимірів для уникнення внесення невинуватених помилок, які пов'язані із обчисленнями. Під час обчислень слід зберігати у результаті на один знак більше, ніж має залишитись у остаточній відповіді. При аналізі одержаних результатів істотну допомогу надає їхнє графічне зображення.

Наприкінці заняття студент подає отримані результати на перевірку викладачеві, який своїм підписом засвідчує виконання експериментальної частини роботи та надає поради щодо подальшого оформлення звіту. Робота вважається виконаною, якщо студент подає результат із оцінкою похибки, а не тільки експериментальні дані (у вигляді таблиці або графіку).

Звіт про роботу студент оформлює у робочому зошиті, де наводить експериментальні дані у вигляді таблиць та графіків, розрахунок експериментальних величин та їхніх похибок, записує остаточний результат, подає у письмовому вигляді відповіді на запитання, що поставлені у кінці опису роботи. Повністю оформлений звіт про виконання лабораторної роботи студент має захистити до початку виконання наступної роботи. Щоб одержати

позитивну оцінку при захисті студент має не лише викласти зміст та результати виконаної роботи, а й відповісти на теоретичні питання в обсязі теми роботи.

У процесі вдумливої сумлінної праці у практикумі студент навчиться:

- застосовувати теоретичні знання в експериментальній роботі;
- правильно ставити експеримент та уникати помилок;
- аналізувати результати дослідів;
- набути практичних знань, необхідних для проведення обробки медико-біологічних даних, та навичок проведення математичної та комп'ютерної обробки медико-біологічної інформації, що впливає на формування у студента розуміння загальних фізичних та біофізичних закономірностей, що лежать в основі процесів, які відбуваються в організмі людини.

***ПРИМІТКА. При рейтинговій системі навчання для отримання високого балу при здачі теорії до лабораторної роботи необхідно виводити формули і аналізувати закономірності.***

### ***Порядок роботи в лабораторії***

1. Підготуватись до навчальної практики: вивчити теоретичний матеріал та ознайомитись зі змістом лабораторної роботи практикуму.
2. Ощадливо витрачати реактиви, обладнання та матеріали.
3. Дотримуватись правил безпечної роботи.

## ВСТУП

Під час руху нестисливої рідини між суміжними шарами, які рухаються з різними швидкостями, виникає **внутрішнє тертя**, викликане властивістю рідини чинити опір відносному руху (зсуву) частинок. Ця фізична властивість рідини називається **в'язкістю**.

Обумовлена в'язкістю сила внутрішнього тертя спрямована в бік, протилежний напрямку руху потоку, чим викликає опір цьому руху з боку рідини. Тобто в'язкістю визначається здатність рідини чинити опір зсувним дотичним зусиллям. Ця сила залежить від роду рідини, поверхні дотику шарів  $S$ , відносної швидкості руху шарів  $dV / dn$

$$F = \eta S \frac{dV}{dn},$$

де  $\eta$  - коефіцієнт, який характеризує рідини (його називають **динамічним** або абсолютним **коефіцієнтом в'язкості**).

Динамічний коефіцієнт в'язкості виражає силу тертя на одиницю поверхні між двома шарами рідини, які ковзають один по одному, коли на одиницю довжини нормалі до поверхні ковзання швидкість руху змінюється на одиницю. Динамічна в'язкість вимірюється в Паскаль-секундах ( $Па \cdot c$ ).

Якщо врахувати, що в'язка рідина стислива, тоді її можна описати **реологічним рівнянням**

$$\sigma_{ik} = -p\delta_{ik} + \xi \dot{\epsilon}_{ll}\delta_{ik} + 2\eta(\dot{\epsilon}_{ik} - \frac{1}{3}\dot{\epsilon}_{ll}\delta_{ik}),$$

де  $\xi$  - коефіцієнт об'ємної в'язкості,  $\eta$  - коефіцієнт зсувної в'язкості.

Також зустрічається відношення динамічного коефіцієнта в'язкості  $\eta$  до густини рідини  $\rho$ , яке називають **кінематичним коефіцієнтом в'язкості**

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}.$$

За одиницю виміру кінематичного коефіцієнта в'язкості прийнято квадратний метр за секунду ( $м^2/с$ ).

Вивченням методів вимірювання в'язкості займається **віскозиметрія**. Широкий діапазон зміни в'язкості від  $10^{-5} Па \cdot c$  для газів до  $10^{12} Па \cdot c$  для полімерів, а також необхідність вимірювання в'язкості в умовах низьких чи високих температур і тисків обумовлює наявність значної кількості методів віскозиметрії і конструкцій відповідних приладів - **віскозиметрів** (від лат. «viscosus»- в'язкий, липкий і грец. «μετρεω» - вимірюю).

Найбільш розповсюдженими є такі **методи вимірювання в'язкості** газів та рідин: капілярний, кульки, що падає, та співвісних циліндрів (ротаційний). Ці методи ґрунтуються відповідно на законі Пуазейля, законі Стокса та законі течії рідини між співвісними циліндрами. В'язкість визначають також по загасання періодичних коливань пластини, поміщеної у досліджуване середовище. Особливу групу утворюють методи вимірювання в'язкості в малих обсягах середовища (мікрров'язкість). Вони засновані на спостереженні броунівського руху, рухливості іонів, дифузії частинок.

Відповідно існує декілька **типів віскозиметрів**, різних за конструктивними особливостями і принципом дії:

- **капілярні** - визначається час протікання відомої кількості рідини крізь капілярні трубки. До приладів такого типу відноситься віскозиметр Оствальда. За допомогою капілярних віскозиметрів визначається кінематичний коефіцієнт в'язкості малов'язких рідин;
- **кулькові** - визначається час проходження падаючою кулькою проміжна між мітками каліброваної трубки, заповненої дослідною рідиною. До приладів такого типу відноситься віскозиметр Гепплера. Знаючи діаметр кульки, густину матеріалу, з якого вона виготовлена, густину рідини і час падіння кульки між двома мітками, можна визначити динамічний коефіцієнт в'язкості  $\eta$  рідини;
- **ротаційні** - вимірюється крутний (обертаючий) момент чи кутова швидкість обертання одного з двох співвісних тіл, в зазорі між якими знаходиться дослідна рідина. До приладів такого типу відноситься віскозиметр Воларовича. Шкала такого приладу проградуєвана в одиницях динамічної в'язкості  $\eta$  чи в одиницях, пропорційних  $\eta$ ;
- **ультразвукові** - вимірюється швидкість затухання коливань магнітострикційних матеріалів, які знаходяться в дослідній рідині.

Зазвичай такі методи дають можливість визначити *кінематичну в'язкість*, а для визначення *динамічної в'язкості* потрібно знати *густину* досліджуваної рідинної системи. Густина — найважливіша фізична властивість речовини в рідкому стані. Більшість фізичних властивостей медико-біологічних рідинних систем безпосередньо пов'язані з густиною. Найбільш розповсюджені методи визначення густини є:

- **Метод гідростатичного зважування** – це відносний метод, який заснований на визначенні втрати ваги тіла при зануренні його в еталонну рідину.
- **Флотаційний метод** – це відносний метод, який заснований на визначенні густини рідинної системи яка знаходиться у флотаційній рівновазі з тілом відомої густини.
- **Пікнометричний метод** – це прямий метод, який заснований на визначенні маси тіла та його об'єму.

Окрім механічних властивостей рідинних систем важливими є також і *теплофізичні властивості*. Вони обумовлюють характер і швидкість процесу нагрівання або охолодження рідинних медико-біологічних систем. Всі характеристики рідинних систем залежать від температури.

**Температура** є мірою кінетичної енергії хаотичного (теплого) руху молекул системи, яка знаходиться в стані рівноваги.

Історично склалося, що температуру вимірюють використовуючи різні шкали: за Кельвіном, за Цельсієм, за Фаренгейтом, за Ранкіном, за Делілем, за Ньютоном, за Реомюром, за Рьомером. Діапазон температур який створила людина від майже 0 K до  $10^{13}$ K. Зрозуміло, що для такого діапазону температур неможливо існування одного методу вимірювання температури. Тому існує ряд методів вимірювання температури: газові та конденсаційні термометри, рідинні термометри, манометричні термометри, термометри опору, термоелектричні термометри (термопара), магнітна термометрія, термошумові термометри, пірометри.

До теплофізичних властивостей рідинних систем відносяться: *питома теплоємність, коефіцієнти теплопровідності та температуропровідності, температурний коефіцієнт об'ємного розширення*.

**Температурний коефіцієнт об'ємного розширення** показує здатність тіла змінювати свій об'єм при зміні температури. Зростання об'єму тіл при нагріванні пов'язане з асиметрією потенційної енергії взаємодії частинок тіла.

Дослідження температурних залежностей питомої теплоємності дає можливість визначити температури та питомі теплоти фазових переходів та температури релаксаційних процесів, що є важливим для визначення температурного інтервалу функціонування медико-біологічних систем.

***Методи вимірювання*** питомої теплоємності та визначення характеристик фазових переходів і релаксаційних процесів відносяться:

- **Диференціально скануюча калориметрія (ДСК)** – це відносний метод, в якому різниця енергій, наданих досліджуваній речовині та зразкові для досягнення однакової температури, записується як функція температури.
- **Диференціальна динамічна калориметрія (ДДК)** – це відносний метод, який заснований на визначенні різниці між тепловими потоками, що надходять до зразка і еталона.
- **Диференціально термічний аналіз (ДТА)** – це відносний метод, який заснований на вимірюванні температур між зразком та еталоном.



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

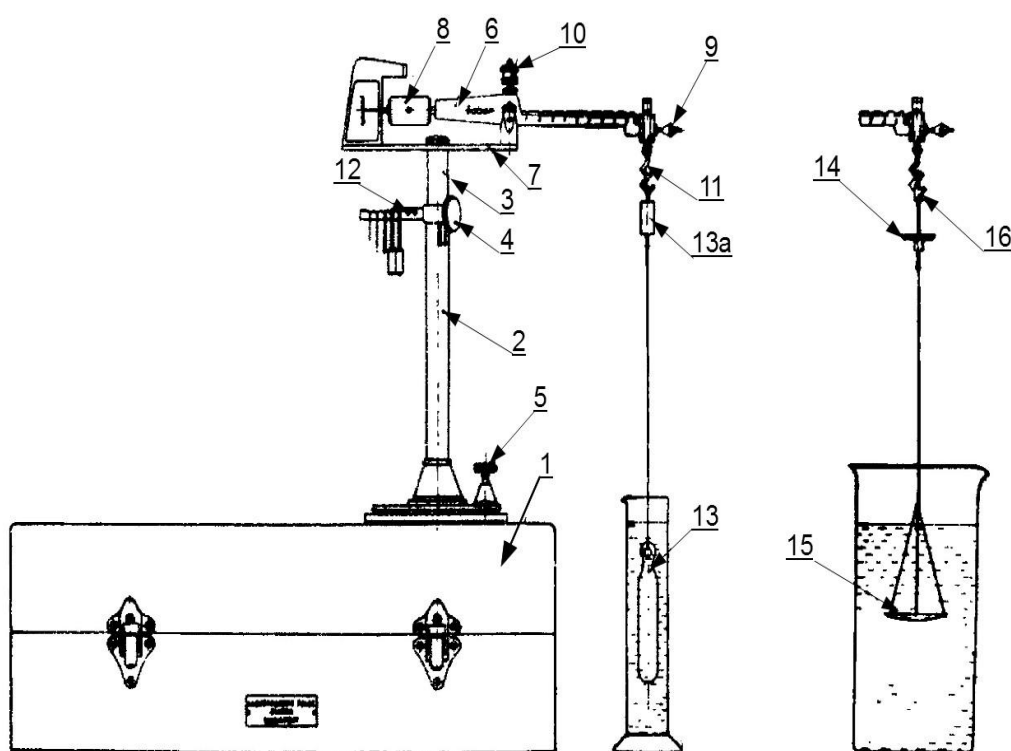
### **ВИЗНАЧЕННЯ ГУСТИНИ ТВЕРДИХ ТІЛ ТА РІДИН МЕТОДОМ ГІДРОСТАТИЧНОГО ЗВАЖУВАННЯ**

**Мета роботи:** опанувати визначення густини твердих тіл та рідин методом гідростатичного зважування,

**Прилади та обладнання:** терези для гідростатичного зважування системи Мора-Вестфаля, дистильована вода, набір термометрів.

#### ОПИС УСТАНОВКИ

Вигляд терезів для гідростатичного зважування системи Мора-Вестфаля показаний на рис. 1.1.



**Рис. 1.1. Терези для гідростатичного зважування системи Мора-Вестфаля**

Терези вкладаються у ящик **1** з полірованого дерева твердої породи, що закривається язичковим затвором. Висота стовпчика терезів, установленного на триножній підставці, змінюється витяжкою вставного стрижня **3**, що фіксується на необхідній висоті за допомогою гвинта **4** з торованою голівкою. Гвинт **5** постаменту здійснює відхилення стовпчика від вертикалі.

Коромисло **6** терезів спирається на основу **7** через сталеві подушку і призму. Установлення на одному кінці основи шкала служить для правильної установки коромисла терезів. З двох сторін коромисла знаходяться тягарця для установки

рівноваги, а саме: наприкінці короткого плеча коромисла знаходиться тягарець **8** для грубої установки з стрілкою, зверненою до шкали, а на довгому кінці – гайка тонкого регулювання **9**. Гвинт **10** для регулювання чутливості знаходиться поруч з головною призмою.

Частина коромисла між головною призмою і призмою, що несе бугель, розділена на десять рівних частин. На останньому діленні за допомогою призми і подушки з твердої сталі підвішений бугель **11**, що на своєму подвійному гачку возить арматуру, необхідну для зважування. Тягарцем є виготовлений із зігнутого нікельованого латунного дроту найбільший П-подібний рейтер «1». Вага цього рейтера точно відповідає вазі дистильованої води температурою 20°C, витиснутій поплавцем. Для забезпечення можливості визначення густини (питомої ваги) рідин важче та легше води, до ваг додано 2 таких рейтери. Вага більш легких рейтерів дорівнює 1/10 (рейтер «0,1»), 1/100 (рейтер «0,01»), 1/1000 (рейтер «0,001») часткам одиничного рейтера. Поза експлуатацією наважки розташовуються на стрижні **12**, змонтованому на колонці терезів. Розташовані у шухляді чашка для наважок, що занурюється, чашка для важків і комплект важків, необхідних для визначення густини твердих речовин.

## ПІДГОТОВКА ДО РОБОТИ

Зібрати вийняті із шухляди частини терезів. Установити колонку в рамку з повстяною прокладкою на кришці шухляди. На стовпчик поставити коромисло, наприкінці якого навісити бугель, а на нижній гачок бугеля - при визначенні густини рідин - скляний поплавець **13**, що висить на зрівняльній наважці **13a** за допомогою тонкого дроту. Зібрані терези варто ретельно збалансувати.

У скляний циліндр із підставкою налити дистильованої води температурою 20°C. Зміною висоти вставного стержня занурити поплавець у скляний циліндр так, щоб він був повністю покритий водою. При підвішуванні найбільшого зрівняльного рейтера на верхній гачок бугеля, стрілка терезів повинна знаходитись знову в середині шкали.

Для визначення густини твердих тіл, на нижній гачок бугеля спершу навішують чашку для наважок **14**, а на гачок - чашку, що занурюється **15**, яка висить також на дротинці. Якщо на чашку для наважок кладеться наважка вагою 20 г, то терези повинні бути урівноважені.

Терези випускаються у від'юстованому вигляді. У випадку, якщо після зборки рівноваги не вийде, то гвинтом **5** підстави і тарувальною гайкою **9**, що знаходиться наприкінці коромисла, терези необхідно врівноважити.

## ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

### I. Визначення питомої ваги рідин

**До зважування терези потрібно врівноважити!** Випробувану рідину налити в попередньо ретельно очищений і висушений скляний циліндр із підставою. Доцільно налити стільки випробуваної рідини, щоб рівень її знаходився на 2 - 2,5 см нижче верхнього краю циліндра.

Циліндр установити під поплавець. Зміною висоти стержня терезів поплавець цілком занурюють у рідину, звертаючи увагу на те, щоб він при цьому не торкався ні стінки, ні дна циліндра. Після занурення рівновага очевидно порушується. Для її відновлення на коромисло встановлюються рейтера. Маючи на увазі, що вага великого рейтера точно відповідає вазі витісненої поплавцем дистильованої води з температурою 20°C, рівновагу терезів можна відновити великим рейтером, підвішеним на гачок коромисла у тому випадку, якщо дистильована вода, налита у циліндр, має температуру точно 20°C.

Так, якщо густина випробуваної рідини менше одиниці (тобто **рідина легше води**), то найбільший рейтер обходжений зняти з гачка і перемістити в один з примірювальних карбів так, щоб вістря контрвантажу при даному положенні рейтера знаходилося нижче середини шкали. При цьому вага рейтера, зрозуміло, не означає його номінальної ваги, а тільки таку кількість десятих часток, що відповідає числу карбів, на яке рейтер перемістили з нульового положення. Вагу наступного рейтера, що відповідає одній десятій частці великого рейтера, можна прийняти по номіналі лише в тому випадку, якщо при зважуванні на гачку рівновага ваг точно відновлюється. При установці рейтера в будь-який проміжний карб, його варто прийняти рівним лише сотим часткам номінального. Наступний рейтер означає стільки тисячних часток, на скільки карбів його необхідно перемістити для того, щоб в даному їхньому положенні стрілка коромисла зупинилася точно напроти її. Таким чином, при досягненні рівноваги найбільший рейтер показує 1/10, а наступні 1/100, 1/1000 1/10000, і саме тільки на скількох карбів вони переміщені для досягнення рівноваги. Так, наприклад, якщо найбільший рейтер установлений на сьомий, наступний - на шостий, третій - на другий і останній - на третьому карбі, і при цьому досягається рівновага, то відносна густина досліджуваної рідини дорівнює 0,7623.

Якщо густина випробуваної рідини більше густини дистильованої води при температурі 20°C (тобто **рідина важче води**), то перший з таких, що дорівнюють за вагою рейтерів (один з найбільших рейтерів) необхідно повісити на гак, на якому він відповідає своїй номінальній вазі, у той час як другий ставиться в один з проміжних карбів, де він означає тільки 1/10 частку своєї номінальної ваги. Установкою наступних рейтерів відновлюється рівновага, порушена при зануренні поплавця у випробувану рідину. Відлік робиться так, як зазначено вище. Наприклад, якщо рівновага відновлюється при перебуванні другого великого рейтера на дев'ятому карбі, наступного - на другому, третього - на дев'ятому, то відносна густина випробуваної рідини буде  $1,9290 \text{ г/см}^3$ .

## **II. Визначення Питомої Ваги Твердих Речовин**

На гак бугеля підвісити чашку для наважок **14**, а на неї - чашку, що занурюється **15**. На чашку для наважок поставити наважку вагою 20 г. В цьому положенні терези повинні бути врівноважені, тобто стрілка повинна вказати на середню мітку шкали. У іншому випадку рівновага відновлюється тарувальною гайкою **9**. Випробувана тверда речовина вагою менше 20 г ставиться на чашку **15**, що занурюється, а на чашку для наважок – замість 20 г ставиться стільки наважок, скільки потрібно для зрівноважування ваг. Віднімаючи з 20 г суму важків, що знаходяться на чаші для наважок, одержимо вагу випробуваної речовини.

Після цього речовина, що знаходиться на чашці, яка занурюється, ставиться у великий мірний циліндр (аналітичний стакан), наповнений дистильованою водою з температурою 20°C. При цьому, зрозуміло, стан рівноваги порушується. Для відновлення рівноваги необхідно спочатку повісити вантаж **16**, що компенсує втрату ваги чашкою **15**, а потім порушену рівновагу відновити за допомогою рейтерів. Цифрове значення, отримане відліком положення рейтерів, дає втрату ваги випробуваної речовини. При цьому втрату ваги твердої речовини треба помножити на 10.

Знаючи в такий спосіб вагу випробуваної речовини в сухому стані і втрату ваги при зануренні у воду, густину речовини одержимо діленням першої ваги на вагу, отриману по відліку положення рейтерів. Якщо, наприклад, вага випробуваної речовини, зваженої в сухому стані, дорівнює 7,82 г, а втрата ваги по рейтерам 0,92, то відносна густина випробуваної речовини дорівнює 8,5.

Виміряні на терезах значення дають **відносну густину рідини**, віднесену до густини дистильованої води з температурою 20°C. Ця величина - проста цифра без одиниці виміру. Абсолютна густина і рівна їй за чисельним значенням питома вага можуть бути обчислені з даних, отриманих по терезам.

## **III. Похибки вимірів**

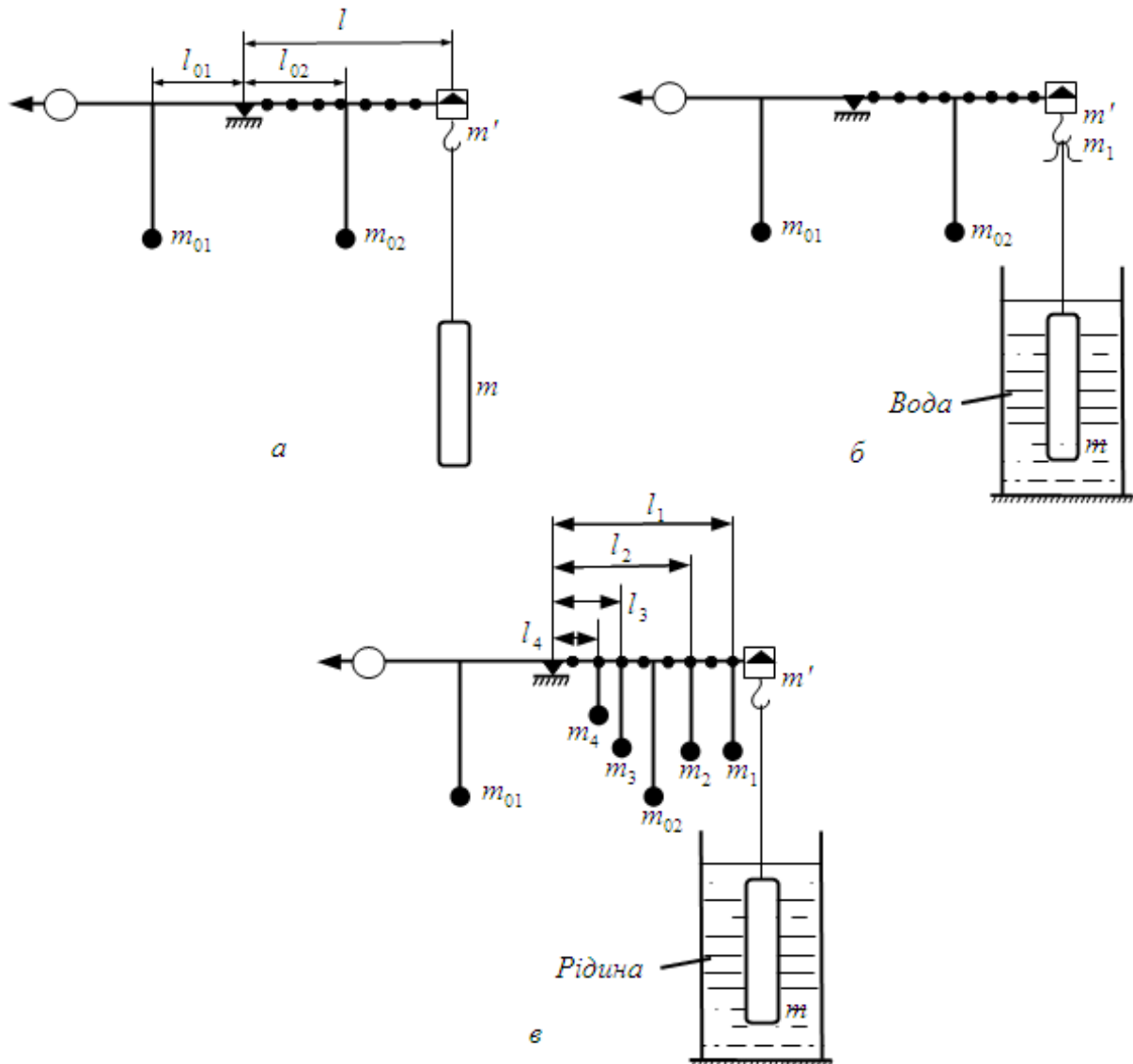
Покази гідростатичних терезів дають лише наближене значення густини. Пояснюється це таким:

- початкове врівноважування коромисла поплавцем здійснюють в повітрі, а не в пустоті, відповідно, при цьому не враховується втрата ваги поплавця в повітрі;
- маса рейтера «1» підгоняється так, що при зануренні поплавця в дистильовану воду при температурі 20°C, покази терезів дорівнюють 1, тобто вони не відповідають густині води при цій температурі ( $0,9982 \text{ г/см}^3$ );
- підбір поплавця та регулювання терезів проводять при 20°C, тоді як на практиці терези застосовують для визначення густини при різних температурах, що викликає зміну об'єму поплавця, відповідно, і ваги витісненої рідини.

Саме тому при вимірюванні до вирахованого значення відносної густини  $\rho$  слід ввести відповідні поправки.

Виведемо **рівняння, що встановлює зв'язок між густиною досліджуваної рідини і показами гідростатичних терезів.**

Схематично три зважування, що виконуються послідовно при визначенні густини рідини, показані на рис. 1.2.



**Рис. 1.2. Схема послідовних урівноважень коромисла гідростатичних терезів: а — поплавець у повітрі; б — поплавець у воді; в — поплавець у досліджуваній рідині**

Введемо такі позначення:

- $m, V_{20}$  – маса та об'єм при температурі 20°C поплавця, відповідно;
- $m_1, m_2, m_3, m_4, V_1, V_2, V_3, V_4$  – маси та їхні об'єми рейтерів «1», «0,1», «0,01», «0,001», відповідно;
- $m'$  і  $V'$  – маса та об'єм бугеля із підвешеною до них дротинкою;
- $m_{01}, V_{01}$  та  $m_{02}, V_{02}$  – маса та об'єм лівого та правого, відповідно, плеча коромисла із протизагою;
- $\rho_{20}$  – густина досліджуваної рідини при температурі 20°C;
- $\rho'_{20}$  – густина дистильованої води при температурі 20°C;
- $D$  – густина повітря при температурі 20°C і тиску 760 мм рт. ст. (101322 Па);

$\sigma'_{20}$  – коефіцієнт поверхневого натягу дистильованої води при температурі 20°C;  
 $\sigma_{20}$  – коефіцієнт поверхневого натягу досліджуваної рідини при температурі 20°C;  
 $g$  – прискорення вільного падіння;

$a = \frac{\sigma'_{20}}{\rho'_{20} g}$  – капілярна стала води;  $a_p = \frac{\sigma_{20}}{\rho_{20} g}$  – те ж для рідини;

$d$  – діаметр дротинки, на якій підвішений поплавця;

$n_{20}$  – розраховане значення відносної густини при зануренні поплавця в рідину з температурою 20°C.

Рівняння рівноваги коромисла з поплавцем в повітрі (рис. 2 а) має вигляд

$$(m_{01} - v_{01}D)l_{01} = (m_{02} - v_{02}D)l_{02} + [m + m' - (v_{20} + v')D]l \quad (1.1)$$

У місці дотику дротинки поплавця з поверхнею води, в яку він занурений, утворюється меніск, маса якого може бути обчислена як  $\pi da \rho'_{20}$  ([1]). Тоді рівняння рівноваги коромисла з поплавцем, зануреним у воду (рис. 1.2 б), коли до бугеля підвішений рейтер «1», має вигляд:

$$(m_{01} - v_{01}D)l_{01} = (m_{02} - v_{02}D)l_{02} + \pi da (\rho'_{20} - D)l + \\ + [m + m' + m_1 - (v_1 + v')D - v_{20}\rho'_{20}]l \quad (1.2)$$

Для випадку поплавця, зануреного в рідину легше води (рис. 1.2 в), рівняння рівноваги набуває вигляду:

$$(m_{01} - v_{01}D)l_{01} = (m_{02} - v_{02}D)l_{02} + \pi da_p (\rho_{20} - D)l + \\ + [m + m' - v'D - v_{20}\rho_{20}]l + (m_1 - v_1D)l_1 + (m_2 - v_2D)l_2 + \\ + (m_3 - v_3D)l_3 + (m_4 - v_4D)l_4 \quad (1.3)$$

Після відповідних перетворень, розв'язуючи разом рівняння (1.1) – (1.3), отримаємо:

$$m_1 - v_1D = (v_{20} - \pi da)(\rho'_{20} - D) \quad (1.4)$$

$$m_1 - v_1D = \frac{1}{n_{20}}(v_{20} - \pi da_p)(\rho_{20} - D) \quad (1.5)$$

Рівняння (1.4) встановлює залежність між об'ємом поплавка і масою рейтера «1». Прирівнявши праві частини рівнянь (1.4) та (1.5), отримаємо шуканий вираз для визначення густини досліджуваної рідини (в  $г/см^3$ ) за показами гідростатичних терезів

$$\rho_{20} = \frac{v_{20} - \pi da}{v_{20} - \pi da_p}(\rho'_{20} - D)n_{20} + D \quad (1.6)$$

Значення капілярних сталих для деяких рідин наведено у [1].

Легко показати, що формула (1.6) справедлива і при визначенні густини рідини важчої за воду.

Більш зручною для користування є дещо видозмінена формула (1.6)

$$\rho_{20} = \frac{1 - \frac{\pi da}{v_{20}}}{1 - \frac{\pi da_p}{v_{20}}} (\rho'_{20} - D) n_{20} + D \quad (1.7)$$

Звідки, нехтуючи малими величинами другого порядку, отримаємо

$$\rho_{20} = A(\rho'_{20} - D) n_{20} + D, \quad (1.8)$$

де

$$A = 1 - \frac{\pi d}{v_{20}} (a - a_p). \quad (1.9)$$

Розрахунки показують, що для рідин, близьких по капілярним властивостям до води, при діаметрі дротинки поплавця не більше 0,2 мм  $A = 1 - \frac{\pi d}{v_{20}} \approx 1$ , причому помилка не перевищує приблизно 0,0001 г навіть у терезів з невеликим поплавцем об'ємом 5 см<sup>3</sup>.

Для таких випадків отримаємо наступну формулу, яка широко застосовується в практиці користування гідростатичними вагами:

$$\rho_{20} = (\rho'_{20} - D) n_{20} + D. \quad (1.10)$$

Оскільки  $\rho'_{20} = 0,9982 \text{ г / см}^3$  і  $D = 0,0012 \text{ г / см}^3$ , то

$$\rho_{20} = 0,9970 n_{20} + 0,0012 \text{ г / см}^3. \quad (1.11)$$

Формулу (1.11) можна записати у вигляді

$$\rho_{20} = n_{20} - (0,0030 n_{20} - 0,0012),$$

звідки

$$\rho_{20} = n_{20} - C, \quad (1.12)$$

де

$$C = 0,0030 n_{20} - 0,0012 \text{ г / см}^3 \quad (1.13)$$

являє собою **поправку**, яку потрібно вирахувати за показами гідростатичних терезів, щоб отримати значення густини рідини.

Як видно з формули (1.13), поправка  $C$  залежить лише від показів терезів; вона однакова для різних рідин і може бути попередньо обрахована для різних значень  $n_{20}$  (**таблиця 1.1**); для проміжних значень поправку визначають лінійним інтерполюванням із заокругленням до одиниці четвертого десяткового знаку.

Таблиця 1.1

**Поправка при обрахунку густини рідини**

$n_{20}$	$C, \text{г/см}^3$	$n_{20}$	$C, \text{г/см}^3$	$n_{20}$	$C, \text{г/см}^3$
0,5	0,0003	1,1	0,0021	1,6	0,0036
0,6	0,0006	1,2	0,0024	1,7	0,0039
0,7	0,0009	1,3	0,0027	1,8	0,0042
0,8	0,0012	1,4	0,0030	1,9	0,0045
0,9	0,0015	1,5	0,0033	2	0,0048
1	0,0018				

**Приклад**

Результати розрахунку за показами гідростатичних терезів  $n_{20}$  при вимірюванні густини рицинової олії, температура якої  $20^\circ\text{C}$ , складає 0,9468. Яка густина олії?

Відповідно таблиці 1.1 поправка  $C$ , знайдена інтерполяванням, складає (заокруглено)  $0,0016 \text{ г/см}^3$ . Отже, за формулою (1.12) шукана густина олії

$$\rho_{20} = 0,9468 - 0,0016 = 0,9452 \text{ г/см}^3.$$

Зазвичай температура рідини при вимірюванні густини не дорівнює  $20^\circ\text{C}$ , тобто справжній об'єм поплавця, зануреного у рідину, відрізняється від його об'єму, за яким регулювали ваги. У такому випадку

$$\rho_t = (0,9970n_t + 0,0012) [1 + \beta(20 - t)] \quad (1.14)$$

де  $\rho_t$  – густина рідини при температурі  $t$ ,  $\text{г/см}^3$ ;  $n_{20}$  – покази терезів при температурі  $t$ ;  $\beta$  – коефіцієнт об'ємного розширення скла, з якого виготовлений поплавок,  $^\circ\text{C}^{-1}$ .

Отриманий вираз подібний до формули (1.11) та відрізняється від неї множником, що враховує зміну об'єму поплавку.

Практично формулою (1.14) доцільно користуватись при вимірюванні густини рідини, температура якої відрізняється від  $20^\circ\text{C}$  більше ніж на  $\pm 5^\circ\text{C}$ ; похибка пов'язана з тепловим розширенням поплавця, може складати (на кожні  $20^\circ\text{C}$ ) до п'яти одиниць четвертого десяткового знака при густині, близькій до  $2 \text{ г/см}^3$ , і до 2,5 одиниці при густині близькій до  $2 \text{ г/см}^3$ .

**Контрольні питання.**

1. У чому полягає метод гідростатичного зважування?
2. Чи можна визначити густину ртуті?
3. Чи можна в цьому методі замість води, при визначенні густини твердого тіла, використати іншу рідину?
4. Чи можна цим методом визначити густину парафіну?
5. Чи можна за допомогою цього методу оцінити концентрацію рідинної системи, наприклад, концентрацію розчину декстрану?



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

### ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ ГУСТИНИ РІДИН ФЛОТАЦІЙНИМ МЕТОДОМ

**Мета роботи:** визначити температурну залежність густини рідини.

**Прилади та обладнання:** термостат ТС-24, посудина з подвійними стінками, аналітичні терези, набір поплавків.

#### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

**Густина** — найважливіша фізична властивість речовини в рідкому стані. Більшість фізичних властивостей рідин безпосередньо пов'язані з густиною, її зміною при зміні термодинамічних параметрів. Тому вимірювання густини має суттєве значення для проведення дослідницьких робіт у різних галузях науки і техніки. На жаль, у даний час ще не відома точна функціональна залежність густини рідини від температури у всьому інтервалі існування рідкої фази. Це вказує на складність цієї залежності.

Згідно з дірковою теорією рідин, запропонованою Френкелем, залежність об'єму рідини від температури може бути описана виразом:

$$V - V_0 = N \Delta V e^{-\frac{U}{k_B T}}, \quad (2.1)$$

де  $V$  - об'єм рідини;

$V_0$  - сумарний об'єм всіх структурних частинок рідини, що може бути ототожнений зі сталою  $b$  в теорії Ван-дер-Ваальса;

$\Delta V$  - деяка величина, за змістом рівна мінімальному об'єму «дірки» в рідині;

$N$  - число частинок рідин;

$U$  - енергія утворення «дірки»;

$k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$  - стала Больцмана;

$T$  - абсолютна температура.

Емпірична формула для опису температурної залежності об'єму рідини, запропонована Авенаріусом, не узгоджується з експериментом поблизу критичної точки:

$$V = a - b \lg(T_c - T), \quad (2.2)$$

де  $V$  - об'єм рідини;  $a$  і  $b$  - деякі константи;  $T_c$  - критична температура;  $T$  - температура рідини.

Для рідин, у яких передбачається асоціація (спирти), потрібно використовувати більш складні формули. Становище суттєво спрощується, якщо розглядати одночасно густини рідини і насиченого пару. Напівсума густин рідини і пари є лінійною функцією температури (**правило прямолінійного діаметру**):

$$\frac{\rho_p + \rho_n}{2} = \gamma(T_c - T) + \rho_c, \quad (2.3)$$

де  $\rho_p$  і  $\rho_n$  - відповідно густини рідини і насиченої пари;

$\rho_c$  - критична густина;  
 $T_c$  - критична температура;  
 $T$  - температура речовини;  
 $\gamma$  - деяка стала.

Справедливість цього правила видно з рис. 2.1. Для рідин подібної молекулярної структури (спирти) діаметри практично збігаються.

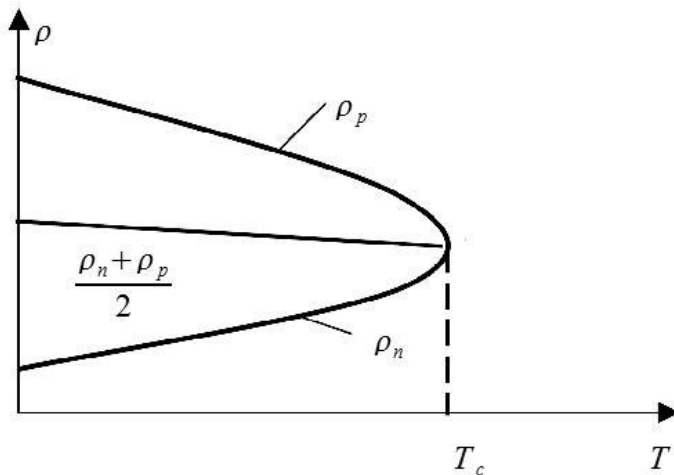


Рис. 2.1. Правило  
 прямолінійного діаметра  
 (правило Кальсте-  
 Матіаса)

Можна виділити такі **основні методи експериментального вимірювання густини рідин**:

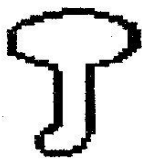
- метод гідростатичного зважування;
- вимірювання густини вібраційними густиномірами;
- флотаційний метод;
- пікнометричний метод.

### **Флотаційний метод вимірювання густини рідин**

Відмінність цього методу від інших згаданих полягає у тому, що він дозволяє проводити виміри в широкому інтервалі густини, а саме, від 0,7 до 1,2 г/см<sup>3</sup>, а також в інтервалі температур від 10 до 150°C. Цим методом можна користуватись для вимірювання густини прозорих рідин. Цей метод полягає в тому, що занурений у рідину поплавок приводять у зважений стан (флотаційна рівновага), коли він не спливає і не занурюється. Рівноважному стану відповідає рівність густин поплавок і рідини. Визначивши густину поплавка, що відповідає температурі флотаційної рівноваги, тим самим знаходять густину рідини при тій самій температурі, після чого легко обчислити густину для заданої температури.

Найпростіші флотаційні густиноміри являють собою посудину, в якій знаходяться поплавки різної густини. Про густину рідини можна судити за густиною поплавків, що спливають. Один із способів досягнення рівноваги поплавка ґрунтується на поступовій зміні температури рідини, що забезпечує необхідний ефект завдяки значно більшому коефіцієнту теплового розширення у рідин, ніж у поплавків.

Застосування цілого набору поплавків з різною середньою густиною, довжина яких становить 10 – 20 мм і 1 - 1,5 мм діаметром, дозволяє проводити виміри в широкому інтервалі густин і температур. Поплавки виготовляються із тонкого і короткого капіляра з молібденового скла шляхом запаювання його кінців. У процесі запайки другого кінця, повітря, що залишилося всередині поплавка, через нагрівання розширюється і видуває невелику кульку. Така форма поплавка забезпечує вертикальність його положення під час експерименту (рис. 2.2).



**Рис. 2.2. Форма поплавка**

Зовнішній вигляд лабораторної установки наведено на рис. 2.3.



***Рис. 2.3. Зовнішній вигляд лабораторної установки визначення Температурної залежності густини рідин флотаційним методом***

Рідина, що досліджується, разом із зануреними у ній поплавками, знаходиться у запаяній пробірці. Пробірка поміщується в спеціальний скляний прилад, через який пропускається терmostатуюча рідина. При вимірах в інтервалі температур від кімнатної до 90°C терmostатуючою рідиною є вода, а при вимірах до 150°C використовується гліцерин. Запаювання ампул дає можливість проводити виміри при високих температурах (навіть вище точки кипіння), оскільки тиск в ампулі весь час дещо перебільшує тиск насичених парів. Крім того, замкненість ампули дозволяє досліджувати розчини летких речовин, оскільки за таких умов підвищення температури суттєво не впливає на склад рідкої фази.

Поплавки градууються за допомогою рідини, густина якої добре відома. Градування полягає в тому, що поплавок занурюється в рідину, температуру якої підбирають таким чином, щоб поплавок знаходився в стані рівноваги.

Знаючи густину проградуйованої рідини при даній температурі, ми тим самим визначаємо густину будь-якої іншої рідини, в якій цей поплавков при інших умовах (іншій температурі) буде знаходитися в стані рівноваги.

Флотаційний метод дозволяє вимірювати густину рідини з точністю до декількох одиниць сьомого знаку. Проте застосування цього методу для дослідження в широкому інтервалі температур і густин різко знижує точність вимірювання. Даний метод дає можливість визначити абсолютне значення густини малов'язких рідин з точністю  $0,001 \text{ г/см}^3$ .

## ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Опустити проградуйовані поплавки у пробірку із рідиною, яка досліджується. Замалювати їх та описати.

2. Помістити пробірку у термостатуючу посудину з подвійними стінками і приєднати її за допомогою гумових шлангів до термостата.

3. Прогрівати рідину. Відмічати температуру занурення і спливання поплавків, при необхідності користуватися водяним охолодженням. Визначити температури, при яких поплавки будуть знаходитись у флотаційній рівновазі з рідиною.

4. Результати спостережень занести до таблиці:

№ по-плавка	Опис поплавка	Температура занурення	Температура спливання	Температура флотаційної рівноваги

5. Користуючись відомою густиною поплавків, знайти густину даної рідини при різних температурах.

6. Побудувати графік температурної залежності густини для даної рідини.

7. Розрахувати похибки експерименту.

## ПОХИБКИ ВИМІРІВ

Основними причинами, що призводять до появи похибок при вимірюванні густини в даних умовах, є такі.

1) **Неточне визначення концентрації при утворенні розчину**, в цьому випадку визначаються масові долі або масові проценти:

$$C_1 = \frac{m_1}{m_1 + m_2}, \quad C_2 = \frac{m_2}{m_1 + m_2}, \quad (2.4)$$

де  $m_1$  і  $m_2$  – відповідно маси першого і другого компонентів розчину,

$C_1$  і  $C_2$  – масові частки.

Аналітичні терези, що застосовуються, дають відлік з точністю  $0,0002 \text{ г}$ . Ця величина є абсолютною похибкою при зважуванні ( $\Delta m$ ). Згідно теорії похибок,  $m$  пов'язано з абсолютною похибкою масової долі  $\Delta C$  співвідношенням:

$$\Delta C = \frac{\Delta m_1}{m_1 + m_2} + \frac{m_1}{(m_1 + m_2)^2} (\Delta m_1 + \Delta m_2), \quad (2.5)$$

При утворенні близько  $10 \text{ г}$  розчину максимальне значення  $\Delta C = 0,00006$ . Ця похибка в концентрації відповідає похибці в густині  $0,00003 \text{ г/см}^3$ .

2) **Конструкція реле термостата дозволяє змінювати температуру стрибком на 1°C.** Через це уже сама конструкція термостата накладає границю точності вимірювання густини. Наприклад, якщо у рідині температурний коефіцієнт зміни густини досягає  $0.0009 \text{ г/см}^3$  на градус, то величина найменшої зміни температури в термостаті (1 °C) дозволяє зареєструвати зміну густини не менше, чим  $0.0009 \text{ г/см}^3/\text{град}$ , тобто приблизно  $0.001 \text{ г/см}^3/\text{град}$ .

3) Третьою причиною, що призводить до появи похибок при вимірюванні густини, є **теплове розширення поплавка**, оскільки градування даного поплавка і вимірювання з його допомогою, як правило, відбуваються при різних температурах. Якщо взяти коефіцієнт об'ємного розширення молибденового скла таким, що дорівнює  $150 \cdot 10^{-7}$  та вважати, що різниця між температурами градування і вимірювання дорівнює  $50^\circ\text{C}$ , то об'єм поплавка зміниться на  $75 \cdot 10^{-4}$  частину і викличе відносну похибку густини, яка буде дорівнювати

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\Delta V}{V} = 7,5 \cdot 10^{-4} = 0,00075. \quad (2.6)$$

При дослідженні рідини з  $\rho = 1 \text{ г/см}^3$  абсолютна похибка, викликана тепловим розширенням поплавка, становить  $\Delta\rho \approx 0,0007 \text{ г/см}^3$ .

Однією із **головних причин появи похибок** при визначенні густини флотаційним методом є недостатня чистота рідин, за якими градуються поплавки, а також недостатня точність літературних даних про температурну залежність густини цих рідин. Встановлено, що **флотаційний метод дає можливість визначити густину рідин з точністю 0,001 г/см<sup>3</sup>.**

Незважаючи на перераховані недоліки, флотаційний метод має ряд **переваг** порівняно з іншими методами:

- для визначення температурної залежності густини потрібна невелика кількість рідини, що важливо для роботи з дефіцитними об'єктами;
- виміри проводяться в запаяній посудині, відповідно, при роботі з розчинами летких речовин майже виключена можливість зміни їх концентрації під час дослідів;
- замкненість посудини дозволяє проводити виміри в широкому інтервалі температур, майже до критичної;
- у даному методі відсутня операція заповнення приладу рідиною, яка має місце у пікнометричному та дилатометричному методах.

### Контрольні питання

1. Чому тіла при нагріванні розширюються?
2. Як змінюється густина при нагріванні?
3. Чому густина для води зменшується при охолодженні і в якому інтервалі температур це спостерігається?
4. В чому полягає суть флотаційного методу і що таке флотаційна рівновага?
5. Чи залежить густина від тиску? При якому тиску в цій роботі визначалась густина ?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

### ВИЗНАЧЕННЯ В'ЯЗКОСТІ РІДИННИХ СИСТЕМ ВІСКОЗИМЕТРОМ ГЕССА

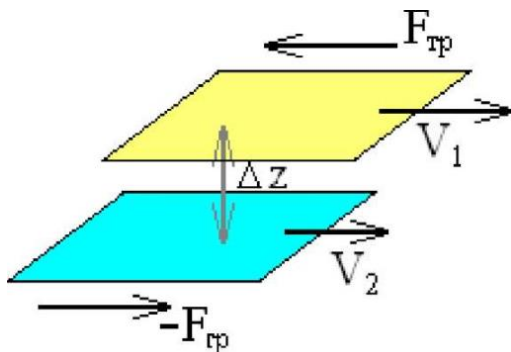
#### Мета роботи:

- ознайомитись з вимірюванням в'язкості рідини віскозиметром Гесса ВК-4,
- дослідити залежність в'язкості рідини від концентрації,
- побудувати графік цієї залежності.

**Прилади та обладнання:** віскозиметр Гесса, розчини рідин різних концентрацій.

#### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

У реальній рідині між молекулами діють сили взаємного притягання, які призводять до внутрішнього або в'язкого тертя. На відміну від сухого тертя, яке виникає при будь-якій відносній швидкості руху (в тому числі і нульовій) двох тіл, що труться, в'язке тертя з'являється лише при відносному русі одних шарів рідини щодо інших. Розглянемо два довільних тонких дотичних між собою шарів рідини (рис. 5.1).



**Рис. 3.1. Два довільних тонких дотичних між собою шари рідини**

Нехай  $V_1$  - швидкість першого шару,  $V_2$  - швидкість другого,  $\Delta z$  - відстань між шарами. Якщо  $V_1 > V_2$ , то перший шар буде захоплювати за собою другий. Це буде відбуватися під дією сили в'язкого тертя, що діє з боку першого шару на другий. Так само, другий шар буде гальмувати перший.

Ньютон показав, що ці сили в'язкого тертя рівні за величиною і протилежні за напрямком, та їх можна розрахувати за формулою:

$$F_T = \eta \frac{\Delta V}{\Delta z} S,$$

де  $\Delta V = V_1 - V_2$ ,  $S$  - площа поверхні шарів,  $\eta$  - коефіцієнт в'язкості, що залежить від властивостей рідини. Спрямовуючи  $\Delta z$  до нуля, отримуємо більш точну формулу:

$$F_T = \eta \frac{dV}{dz} S, \quad (3.1)$$

Розглянемо рух рідини по трубі довжиною  $\ell$  та радіусом  $R$ . Якщо рідина ідеальна (відсутнє тертя), то всі шари рідини рухаються з однаковими швидкостями  $v$ . Нехай  $Q$  - об'ємна швидкість течії рідини (об'єм рідини, що

протікає через переріз посудини за одиницю часу). Легко показати, що тоді **для ідеальної рідини**

$$Q = v\pi R^2,$$

де  $\pi R^2$  - площа поперечного перерізу циліндричної труби.

Для реальної рідини ця формула несправедлива. У таких рідин шари, що прилягають до поверхні труби, мають нульову швидкість, а найбільшу швидкість мають шари, що рухаються по центру труби (див. рис. 5.2).

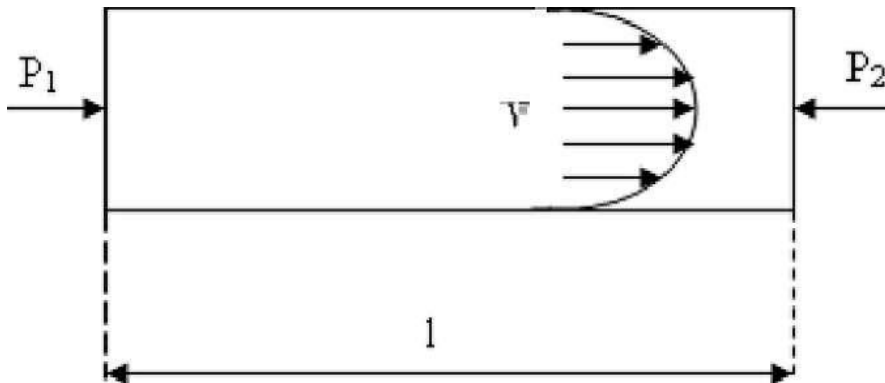


Рис. 3.2. Розподіл швидкостей у вязкій рідині

Рівняння руху реальної рідини має вигляд

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} - \text{grad } p + \eta \Delta \vec{v} + \left( \xi + \frac{\eta}{3} \right) \text{grad div } \vec{v} \quad (3.2)$$

Використовуючи припущення, що:

- по-перше, рідина нестислива;
- по-друге, рух рідини є стаціонарний (тобто відсутнє прискорення:  $\frac{dv}{dt} = 0$ );
- по-третє, швидкість вздовж осі труби не змінюється ( $\frac{dv_x}{dt} = 0$ ),

можна показати, що розподіл швидкостей має вигляд

$$v = \frac{\Delta P}{4\eta l} (R^2 - r^2), \quad (3.3)$$

Швидкість труби максимальна на осі, де вона досягає значення

$$v_0 = \frac{\Delta P}{4\eta l} R^2 \quad (3.4)$$

Обчислимо кількість рідини, яка щосекундно протікає через поперечний переріз труби. Маса рідини, яка щосекундно протікає через кільцеву площадку шириною  $dr$  ( $r$  – внутрішній радіус,  $r + dr$  – зовнішній радіус), дорівнює

$$dQ = 2\pi r dr \rho v.$$

Підставимо вираз для  $v$  і проінтегрувавши, знаходимо шукану витрату рідини:



$$Q = \pi \rho \frac{P_1 - P_2}{2\ell \eta} \int_0^R (R^2 - r^2) r dr$$

Або ж:

$$Q = \frac{\pi \rho R^4 \Delta P}{8\eta \ell} \quad (3.5)$$

Формула (3.5) - **формула Пуазейля**: витрата рідини пропорційна різниці тисків, радіусу труби у четвертому ступені і обернено пропорційна довжині труби та в'язкості рідини.

Рідини, які описуються рівнянням Пуазейля, називають **ньютонівськими**.

У деяких рідинних систем, переважно високомолекулярних, в'язкість також залежить від тиску та градієнту в'язкості. Такі рідинні системи, зокрема кров, називають **неньютонівськими**. Їх в'язкість характеризують умовним коефіцієнтом в'язкості, який відноситься до відповідних умов протікання рідини (тиск, швидкість).

Для визначення коефіцієнта в'язкості **неньютонівських** рідинних систем застосовується метод **капілярного віскозиметра Гесса**.

### Будова пристрою

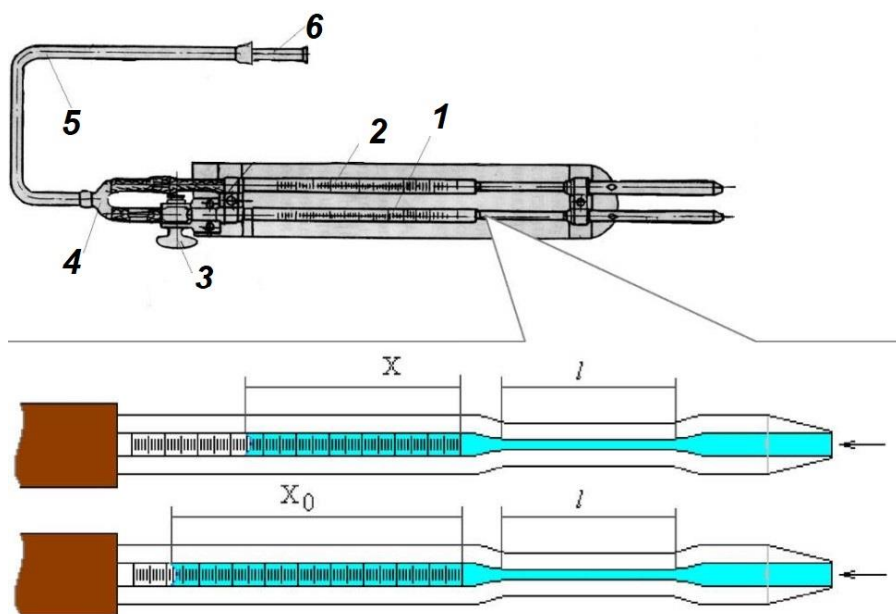
Зовнішній вигляд віскозиметра ВК-4 (віскозиметр Гесса) наведений на рис. 3.3.



**Рис. 3.3. Зовнішній вигляд віскозиметра ВК - 4**



Віскозиметр Гесса (рис. 3.4) являє собою капілярний віскозиметр, призначений для вимірювання коефіцієнта в'язкості крові і розрахований на дуже невелику кількість рідини.



**Рис. 3.4. Будова віскозиметра Гесса**

Віскозиметр складається з двох градуювальних піпеток **1** і **2**, укріплених на загальній підставці. Усередині піпеток проходять капіляри строго однакових діаметрів. Одна з піпеток забезпечена краном **3**. Після того, як в цю піпетку набрана вода, яка служить етalonною рідиною, кран закривається, що дозволяє набрати досліджувану рідину в другу піпетку, не змінюючи рівень набраної води. Обидві піпетки з'єднані з трійником **4**, від якого йде гумова трубка **5** з скляним стерильним наконечником **6**, який видається.

Шляхом всмоктування повітря дві рідини - одна етalonна, інша досліджувана - протікають через два капіляри довжини  $\ell$  (рис. 3.4). Оскільки параметри капілярів і різниці тисків однакові, з формули Пуазейля маємо, що:

$$Q_0 / Q = \eta / \eta_0. \quad (3.6)$$

З іншого боку,  $Q_0 = SX_0$ ,  $Q = SX$ ; де  $S$  - площа поперечного перерізу капіляра, а  $X_0$  та  $X$  - висоти наповнення капілярів досліджуваною і етalonною рідинами. В підсумку отримуємо:

$$\begin{aligned} Q_0 / Q &= X_0 / X = \eta / \eta_0 \\ \eta &= \eta_0 \frac{X_0}{X} \end{aligned} \quad (3.7)$$

### ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Звільніть стерильний наконечник від марлі та вставте у гумову трубку віскозиметра. Наконечник візьміть до роту.
2. Наберіть етalonну рідину у капіляр з краном віскозиметра до нульової позначки і перекрийте кран.

3. Наберіть досліджувану рідину у другій капіляр віскозиметра до нульової позначки і покладіть віскозиметр в горизонтальне положення.
4. Дослідіть шлях, який пройдений рідиною  $X$  при фіксованому шляху  $X_0$  еталонної рідини. Для цього, відкрийте кран і обережно втягуйте ротом повітря з обох піпеток. Обидва стовпа рідини будуть рухатися з різними швидкостями уздовж капілярів. Припиніть втягувати повітря, коли дистильована вода пройде шлях від половини до трьох четвєтих першої піпетки. Дослід повторіть по три рази з кожною концентрацією. Результати вимірювань занесіть в таблиці.
5. За формулою (3.7), де  $\eta$  - коефіцієнт в'язкості досліджуваної рідини,  $\eta_0$  - коефіцієнт в'язкості дистильованої води ( $\eta_0 = 1 \text{ сантиПуаз}$ ), розрахуйте в'язкості досліджуваних рідинних систем з різними концентраціями і заповніть відповідний стовпець таблиці.
6. Розрахуйте абсолютні похибки вимірювань  $\Delta\eta$ . Для цього:

- обчисліть середнє відхилення:  $S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\eta_i - \bar{\eta})^2}{n-1}}$ ;
- дайте оцінку середньому квадратичному відхиленню середньої величини:  $S_{\bar{\eta}} = S / \sqrt{n}$ ;
- при довірчому коефіцієнті  $\alpha = 95\%$  визначте коефіцієнт Стюдента за спеціальними таблицями  $t_{n,\alpha}$ ;
- обрахуйте абсолютні похибки вимірів  $\Delta\eta = t_{n,\alpha} S_{\bar{\eta}}$ .

Продемонструйте процес обрахування хоча б для одного з випадків.

7. Округліть та запишіть результати вимірювань:

При  $C = 10\%$   $\eta = \bar{\eta} \pm \Delta\eta =$  ( ).

При  $C = 5\%$   $\eta = \bar{\eta} \pm \Delta\eta =$  ( ).

При  $C = 2,5\%$   $\eta = \bar{\eta} \pm \Delta\eta =$  ( ).

8. Обрахуйте відносні похибки вимірів і результат запишіть у таблицю:

$$E = \frac{\Delta\eta}{\eta} \cdot 100\%$$

**Таблиця**

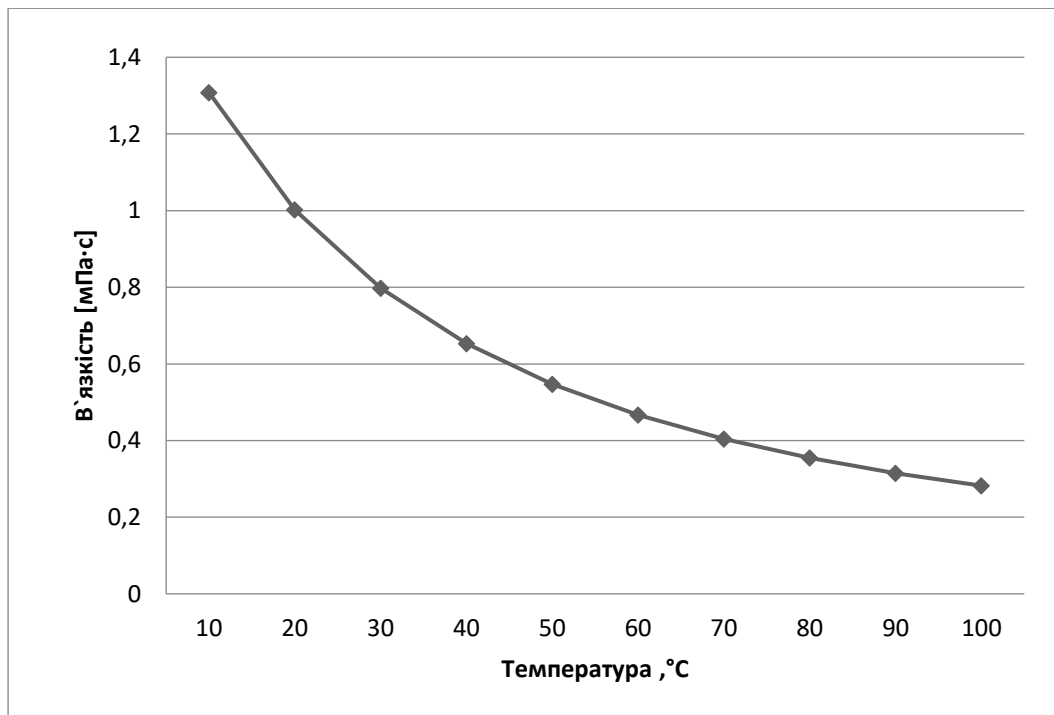
$C, \%$	$X$	$X_0$	$\eta_i$	$\bar{\eta}$	$ \eta_i - \bar{\eta} ^2$	$S_{\bar{\eta}}$	$E = \frac{\Delta\eta}{\eta} \cdot 100\%$
<b>10%</b>							
<b>5%</b>							
<b>2,5%</b>							

9. Побудуйте графік залежності середнього коефіцієнту в'язкості від концентрації:  $\bar{\eta} = f(C, \%)$

10. Зробіть висновки.

### ДОДАТКОВІ ДАНІ

Температура, °C	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
В'язкість, мПа·с	1,308	1,002	0,7978	0,6531	0,5471	0,4668	0,4044	0,355	0,315	0,2822



Графік залежності в'язкості води від температури

### Контрольні питання

1. Що таке ламінарний потік? Чим він відрізняється від турбулентного потоку?
2. Який критерій оцінки виду потоку?
3. Запишіть рівняння Ньютона для в'язкої рідини
4. Дайте визначення в'язкості рідини. Вкажіть одиниці вимірювання.
5. Які рідини відносяться до Ньютонівських?
6. Виведіть формулу Пуазейля?
7. Чи можна вважати кров Ньютонівською рідиною?

## Лабораторна робота № 4

### **ВИМІРЮВАННЯ В'ЯЗКОСТІ РІДИН РОТАЦІЙНИМ ВІСКОЗИМЕТРОМ ВСН-3**

**Мета роботи:** виміряти динамічну в'язкість, пластичну в'язкість, граничне динамічне і граничне статичне напруження зсуву.

**Прилади та обладнання:** віскозиметр ротаційний *ВСН-3*, термостат, термометр.

#### **ОПИС ПРИЛАДУ**

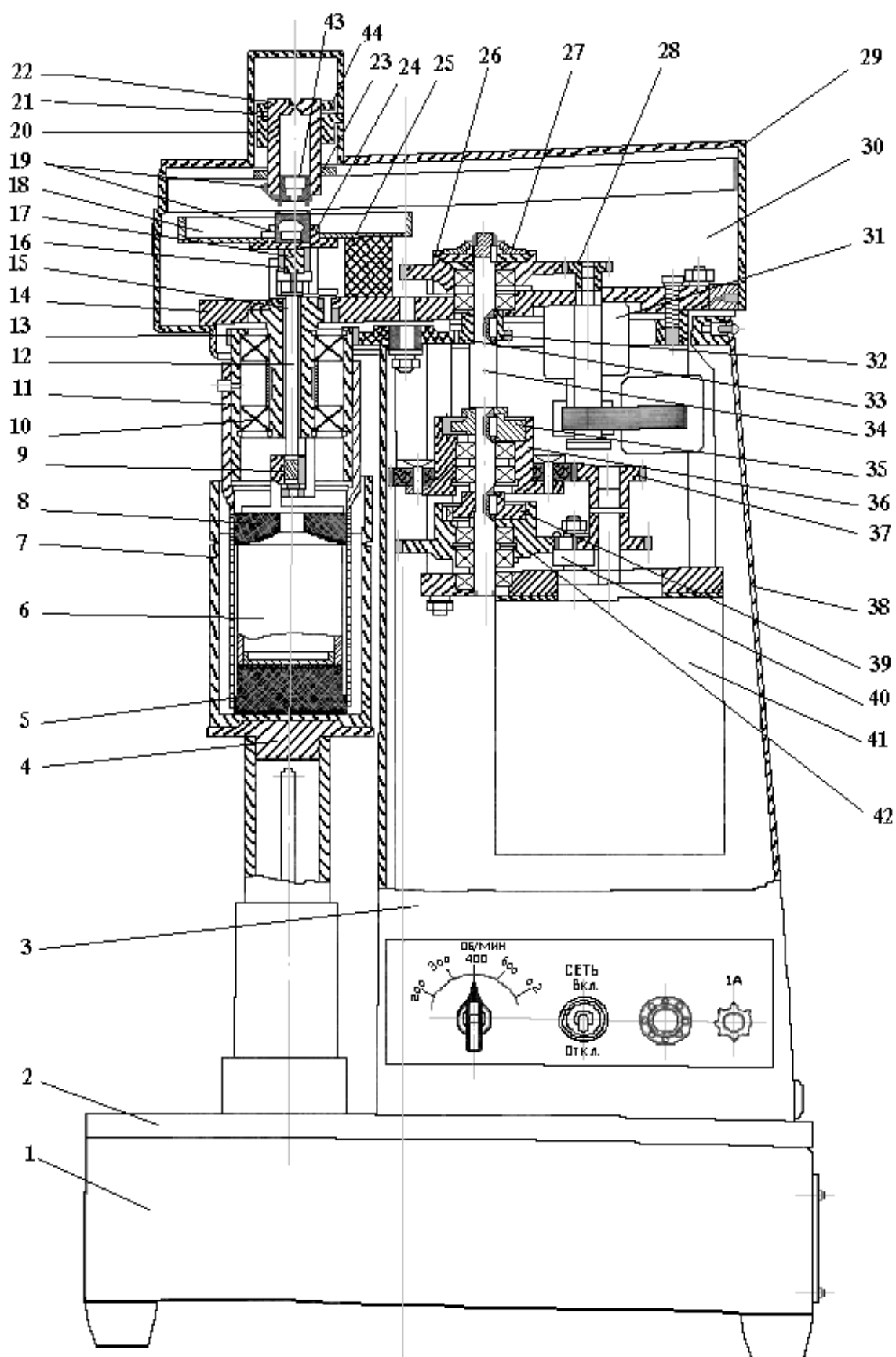
Зовнішній вигляд ротаційного віскозиметра *ВСН-3* наведений на рис. 4.1.



***Рис. 4.1. Зовнішній вигляд  
ротаційного віскозиметра ВСН-3***

Ротаційний віскозиметр (рис. 4.2) складається зі збірного корпусу, вимірювальної системи, приводу і стакану для середовища, що випробовується.

Корпус складається з кожуха **3**, основ **1**, **30**, верхньої плати **14**, нижньої плати **2** та кришок **29**, **38**. На платах змонтовані всі механізми віскозиметра. Вимірювальна система кріпиться до верхньої плати **14** і складається з вимірювального циліндра **6**, закріпленого на осі **12**, яка встановлена на двох кренових опорах **9** і **16**. Для регулювання зазору у напрямку осі використовується підп'ятник опори **16**, закріплений у спеціальному гвинті **17**, який, у свою чергу, переміщується у втулці **15**. На втулці **15** змонтовані підшипники **10**, на зовнішніх обоймах яких посаджена шпindel – шестерня **13**, що передає обертання гільзі **11**. На верхній частині осі **12** встановлена втулка **24**, на якій закріплені шкала **18** і один кінець вимірювальної пружини **23**. Інший кінець пружини закріплений у гвинті **21**, який переміщується у кронштейні **20**.



(С) GMM

**Рис. 4.2. Вязкозиметр ротаційний ВСН-3 (пояснення в тексті)**

Привід віскозиметра складається з електродвигуна **31** типу ДСД-2, двошвидкісного двигуна **41** типу ДСГ-1, муфт обгону **27**, **35**, **37**, блоку шестерень **37**, шестерень **40**, **42**, **36**, **32**, **33**, **14**, **28**, **26** та вала **34**. Привід віскозиметра має п'ять швидкостей: 0.2, 200, 300, 400, 600 об/хв.

При вимірюванні пластичної в'язкості і граничного динамічного напруження зсуву гільза **11** обертається зі швидкістю 200, 300, 400, 600 об/хв. При обертанні валу **41** вліво із швидкістю 300, 1500 об/хв гільза обертається зі швидкістю 200, 400 об/хв. Обертальний момент передається від двигуна **41** через верхній кінець блок – шестерні **37** на шестерню **36**, верхні шарики муфти обгону **35**, вал **34** шестерні **32**, **33** та через шпindel **13** передається гільзі. У цей же час обертання від нижнього кінця блок шестерні **37** передається шестерні **42** через паразитну шестерню **40**. Обертання від шестерні **42** на вал **34** не передається, оскільки нижні кульки муфти обгону **39** не входять у зачеплення із шестерню **42** і ступицею муфти.

При обертанні двигуна **41** вправо, гільза обертається зі швидкістю 300 і 600 об/хв. Обертальний момент від двигуна передається на гільзу через нижній кінець блок шестерні **37**, шестерні **32**, **33** і шпindel **13**. Для підняття стакану **7** з досліджуваною рідиною закріплений телескопічний столик **4**. Електрична схема ротаційного віскозиметра складається з трансформатора *TP1*, електродвигунів *M1* типу ДСД-2 і *M2* типу ДСГ-1, перемикача *B2*, тумблера *B1* і конденсаторів *C1* і *C2*. Електродвигун ДСТ-1 живиться напругою 127 вольт від трансформатора *TP1*.

Зміна положення перемикача *B2* відповідає швидкостям обертання гільзи приладу 0.2, 200, 300, 400, 600 об/хв.

## ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Якщо рідина поміщена між двома паралельними пластинами, які рухаються паралельно одна одній з постійними швидкостями, то в'язкісний опір рідини буде пропорційний до відносної швидкості пластин.

Відповідно до гіпотези Ньютона, має місце наступне співвідношення

$$P = \eta \dot{\epsilon}, \quad (4.1)$$

де  $P$  - напруження зсуву,  $\dot{\epsilon}$  - швидкість деформації,  $\eta$  - коефіцієнт в'язкості при сталій температурі.

Експерименти підтверджують, що більшість реальних рідин мають таку саму залежність між напруженням зсуву та швидкістю деформації. Такі рідини носять назву ньютонівських рідин. В'язкість цих рідин залежить тільки від температури та тиску. Для інших же рідин, наприклад, для колоїдних суспензій, полімерних розчинів, шлаків, лаків, фарб, бурових розчинів і т. д. виявляється, що коефіцієнт в'язкості залежить від величини напруження зсуву. Такі рідини носять назву **неньютонівських в'язких рідин**.

До цього класу рідин відносяться також так звані **бінгамівські** (шведівські) **пластичні рідини**, які течуть у тому випадку, якщо буде перевищена межа текучості  $P_k$  для чистого зсуву, причому швидкість зсуву пропорційна різниці між напруженням  $P$  та граничним напруженням зсуву  $P_k$  і не залежить від матеріалу.

Рівняння Шведова і Бінгама має вигляд:

$$P - P_k = \eta_{nl} \dot{\epsilon}, \quad (4.2)$$

де  $\eta_{nl}$  - пластична в'язкість,  $\dot{\epsilon}$  - швидкість деформації.

Серед різних методів вимірювання в'язкості лише ротаційні прилади (при відносно невеликих зазорах між вимірювальними поверхнями) дозволяють реалізувати деформування досліджуваного матеріалу у полі напружень зсуву дуже високої однорідності. Метод ротаційної віскозиметрії дає можливість визначити не лише одну функцію течії, але і весь комплекс реологічних характеристик матеріалу, включаючи його пружні та міцнісні властивості.

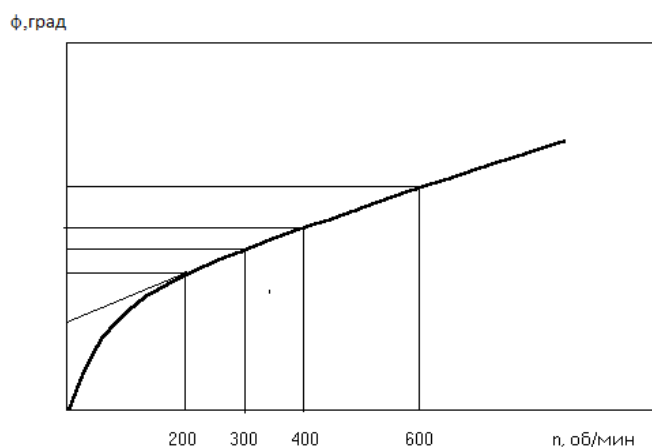
**Ротаційні прилади класифікуються** за формою вимірювальних або робочих поверхонь на наступні групи: диск-диск, кільце-кільце, конус-конус, конус-площина, циліндр-циліндр, сфера-сфера, на півсфера - напівсфера тощо.

У залежності від умов деформування досліджуваного матеріалу розрізняють ротаційні прилади сталих швидкостей деформації, сталих швидкостей зсуву тощо.

Віскозиметр ротаційний *ВСН-3* призначений для вимірювання реологічних пружньо - в'язко - пластичних тіл (наприклад, нафтопродуктів), а також для визначення динамічної в'язкості ньютонівських рідин.

**Принцип дії приладу** заснований на вимірюванні зсувних напружень в контрольованому середовищі, розташованому між зовнішньою гільзою, що обертається, та вимірювальним циліндром, зв'язаним з циліндричною пружиною кручення.

Визначення пластичної в'язкості та граничного динамічного напруження зсуву має зміст лише у тому випадку, коли течія досліджуваної рідини описується моделлю Шведова-Бінгама. Графічна залежність кута повороту шкали від швидкості обертання гільзи для типових в'язко-пластичних рідин приведена на рис. 4.3.



**Рис. 4.3. Графічна залежність кута повороту шкали від швидкості обертання гільзи**

За нахилом пряmolінійної частини кривої течії визначають пластичну в'язкість, а по відрізку, який відтинається продовженням цієї пряmolінійної частини на осі напружень - граничний статичний опір зсуву.

Пластична в'язкість визначається з виразу:

$$\eta = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{n_2 - n_1} A \quad (4.3)$$

де  $\varphi_1, \varphi_2$  - кути повороту шкали,  $n_1, n_2$  - швидкості обертання гільзи,  $A$  - константа приладу.

Граничне динамічне напруження зсуву  $P_k$  визначається з наступного виразу:

$$P_k = \frac{A}{B} \left[ \varphi_2 - \frac{n_2}{n_2 - n_1} (\varphi_2 - \varphi_1) \right] \quad (4.4)$$

де  $B$  - константа приладу.

### ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

#### **Вимірювання динамічної в'язкості ньютонівських рідин.**

1. Надіти гільзу на шпindel.
2. Закрити радіальні отвори в гільзі за допомогою тарировочних гумових кілець.
3. Налити в стакан рідину, що контролюється.
4. Встановити на стакан телескопічний валик
5. Підняти столик.
6. Встановити перемикачем "об/мин" швидкість обертання гільзи 600 об/хв.
7. Ввімкнути термостат. Встановити температуру.
8. Ввімкнути тумблер "Сеть" приладу.
9. Зняти покази кутів закручування (повороту шкали при 600, 400, 300, 200 об/хв) та скласти таблицю.
10. Розрахувати значення в'язкості за формулою:

$$\eta = \frac{\Delta \varphi}{\Delta n} A \quad (4.5)$$

11. Визначити граничну динамічну напругу зсуву з формули (4.4).
12. Визначити статичну напругу зсуву за формулою:

$$P = k \varphi_0 \quad (4.6)$$

де  $\varphi_0$  - визначається з графіка залежності  $n = n(\varphi)$

### ДОДАТКОВІ ДАНІ

**Речовина:** сополімер ПМС-50.

**Константи приладу:**

$$A = 333 \frac{\text{сн} \cdot \text{об} / \text{хв}}{\text{град}} \quad B = 101,1 \frac{\text{сн об} / \text{хв}}{\text{дин} / \text{см}^2} \quad K = 3,27 \frac{\text{Па}}{\text{град}}$$

### Контрольні питання

1. Опишіть принцип роботи ротаційного віскозиметра ВСН-3.
2. Наведіть приклад неньютонівських в'язких рідин.
3. Запишіть рівняння Шведова і Бінгама.
4. Дайте визначення пластичній в'язкості та граничному напруженню зсуву.
5. Намалюйте розподіл швидкостей при русі бінгамівської рідини в ротаційному віскозиметрі.
6. Який діапазон значень в'язкості рідин можна вимірювати за допомогою ВСН-3? Чи можна вимірювати розчини біополімерів цим віскозиметром?



## Лабораторна робота № 5

### ВИЗНАЧЕННЯ В'ЯЗКОСТІ КОНСИСТЕНТНИХ МАСТИЛ РОТАЦІЙНИМ ВІСКОЗИМЕТРОМ РВ-4

**Мета роботи:** визначити в'язкість масла віскозиметром РВ-4.

**Прилади та обладнання:** ротаційний віскозиметр РВ-4, секундомір.

#### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Для вимірювання в'язкості широко використовуються **ротаційні віскозиметри**. У ротаційних віскозиметрах досліджуваний матеріал розміщують у зазорі між двома поверхнями правильної геометричної форми: одна робоча поверхня обертається, а друга – фіксується нерухомо або з'єднується жорстко з динамометричним пристроєм, що вимірює обертальний момент. Метод ротаційної віскозиметрії дає можливість визначити не тільки функцію течії, а і весь комплекс реологічних властивостей матеріалу, включаючи його пружні та міцнісні властивості.

Ротаційні прилади можна кваліфікувати по формі робочих поверхонь, між якими розташовують досліджуваний матеріал, на групи: диск-диск, конус-конус, циліндр-циліндр, сфера – сфера тощо. Вибір геометричної форми робочих поверхонь залежить від природи досліджуваної рідини (ньютонівська або неньютонівська) і діапазону значень в'язкості, що вимірюється.

Всі рідини можна розділити на декілька основних класів.

#### 1. Нормальні непружні (ньютонівські) рідини

До цього класу відносяться всі гомогенні системи, в'язкість яких не залежить від градієнта швидкості (рис. 5.1). Рівняння течії при русі по колу для таких рідин має вигляд

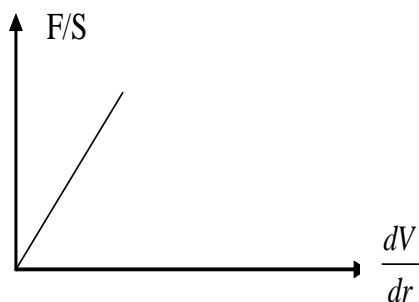


Рис. 5.1. Залежність напруження зсуву від градієнта швидкості для ньютонівських рідин

$$\frac{F}{S} = \eta \left( \frac{dV}{dr} - \frac{V}{r} \right), \quad (5.1)$$

де  $\frac{F}{S}$  - напруження зсуву,  
 $\eta$  - коефіцієнт в'язкості,  
 $\frac{dV}{dr}$  - градієнт швидкості.

## 2. Аномально непружні (неньютонівські) рідини

До цього класу відносяться рідини в'язкість яких є функцією градієнта швидкості (рис. 5.2), і рівняння руху має вигляд:

$$\frac{F^n}{S} = \eta' \frac{dV}{dr} \quad (5.2)$$

де  $n$  і  $\eta'$  – сталі величини для даної рідини та не залежать від розмірів і типу приладів.

До таких систем належать колоїдні розчини.

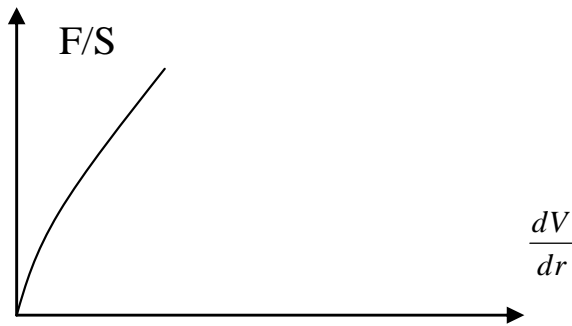


Рис. 5.2. Залежність напруження зсуву від градієнта швидкості для неньютонівських рідин

## 3. Пружні рідини

Речовини даного класу виявляють пружні властивості при дуже малих напруженнях зсуву, але мають сталу в'язкість ( $\eta = \text{const}$ ). Такі речовини можуть бути описані рівнянням Бінгама:

$$\frac{F}{S} - \theta = \eta \left( \frac{dV}{dr} - \frac{V}{r} \right) \quad (5.3)$$

$\theta$  - граничне напруження зсуву.

Для вимірювання в'язкості ньютонівських рідин в ротаційних віскозиметрах використовують будь-який відомий склад геометричних форм, найчастіше це циліндр-циліндр, конус-конус, конус-площина. Неньютонівські рідини можна досліджувати ротаційними віскози-метрами типу циліндр-циліндр при умові малого зазору між ними. Віскозиметр системи професора Воляровича РВ-4 створений для визначення в'язкості бінгамовських систем. Аномалію в'язкості таких систем можна пояснити пружності форми, яка перешкоджає початку течії до того часу, поки напруження зсуву не досягає деякого граничного значення.

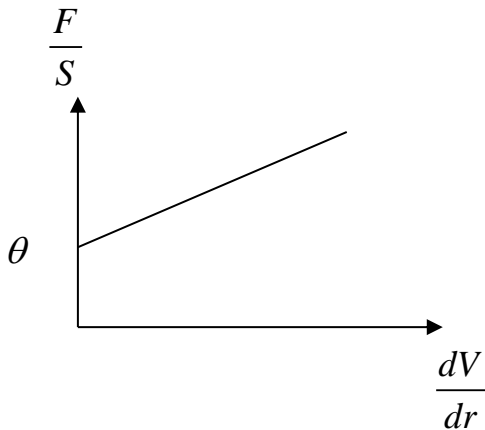


Рис. 5.3. Залежність напруження зсуву від градієнта швидкості для бінгамівських рідин

## ТЕОРІЯ МЕТОДУ

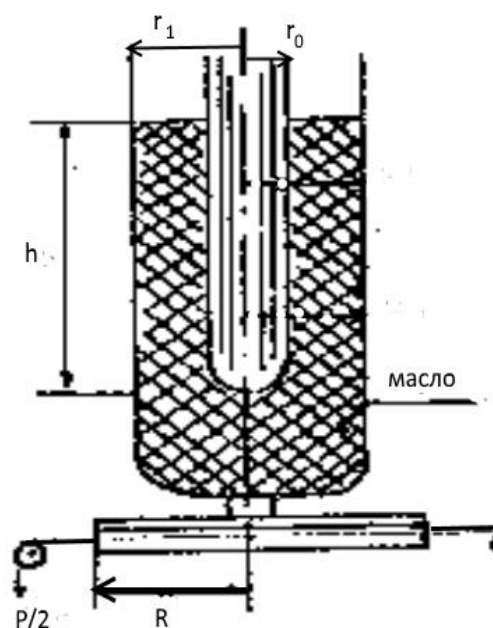
Розглянемо теорію приладу з коаксіальними циліндрами, при цьому будемо виходити з **рівняння Бінгама**, записаного у дещо іншому вигляді:

$$F = S\theta + S\eta \cdot \left( \frac{dV}{dr} - \frac{V}{r} \right) \quad (5.4)$$

На рис. 5.4 показано зовнішній вигляд установки, на рис. 5.5 - принципова схема приладу.



**Рис. 5.4. Зовнішній вигляд установки РВ-4**



**Рис. 5.5. Схема РВ-4**

У досліджувану рідку систему, залиту в зовнішній циліндр, поміщений нерухомий циліндр з рельєфною боковою поверхнею, яка забезпечує краще прилипання дисперсної системи до внутрішнього циліндра. Напруження на поверхні зовнішнього циліндра значно менше, ніж напруження на поверхні внутрішнього циліндра, і його поверхня залишається гладенькою. Зовнішній циліндр обертається за допомогою важків, які прикріплені до кінців нитки, що перекинута через блоки і намотана на барабан радіуса  $R$ .

Виходячи з даної схеми можна написати рівняння для коаксіальних циліндрів:

$$M = 2\pi r^2 h \theta + 2\pi h \eta r^2 \left( \frac{dV}{dr} - \frac{V}{r} \right) \quad (5.5)$$

де  $M$  – момент, що утворюється пружно-в'язким опором зсуву,  
 $r$  – радіус елементарного шару.

Але оскільки:

$$\frac{V}{r} = \omega \quad (5.6)$$

де  $\omega$  – кутова швидкість, то рівняння (5.4) перепишемо у вигляді:

$$M = 2\pi r^2 h \theta + 2\pi h \eta r^3 \cdot \frac{d\omega}{dr} \quad (5.7)$$

Умова рівномірного обертання всіх циліндричних шарів полягає у тому, що обертальний і гальмівний моменти, які відчуває кожний циліндричний шар, повинні дорівнювати одне одному. А це означає, що момент  $M$ , що стоїть у лівій частині рівняння (5.7), дорівнює сталій величині, а саме, - зовнішньому

обертальному моменту, який дорівнює  $M = PgR$ , де  $P$  – вага важків, що падають,  $R$  – радіус барабана.

Інтегруючи рівняння (5.7), одержимо:

$$\omega = -\frac{M}{4\pi\eta hr^2} - \frac{\theta}{\eta} \ln r + C \quad (5.8)$$

Розглянемо два випадки.

### **1. Обертальний момент досягає величини:**

$$M = 2\pi hr^2\theta \quad (5.9)$$

У цьому випадку непружний зсув буде розповсюджуватися до кінця радіуса, який визначається співвідношенням:

$$r = \sqrt{\frac{M}{2\pi h\theta}} = \sqrt{\frac{PgR}{2\pi h\theta}} \quad (5.10)$$

Область між  $r$  і  $r_1$  буде обертатись разом з зовнішнім циліндром як тверде тіло. Звідси і отримуємо **граничні умови**.

При  $M < 2\pi hr_1^2\theta$  :

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega|_{r=r_1} = 0 \\ \omega|_{r=\sqrt{\frac{M}{2\pi h\theta}}} = \Omega \end{array} \right. \quad (5.11)$$

де  $\Omega$  – кутова швидкість зовнішнього циліндра.

Покладаючи у рівнянні (5.8)  $\omega = 0$ , знаходимо  $C$  :

$$C = \frac{PgR}{4\pi\eta hr_0^2} - \frac{\theta}{\eta} \ln r_0 \quad (5.12)$$

З другої граничної умови та (5.12) (одержимо:

$$\Omega = \frac{PgR}{4\pi h\eta} \cdot \left( \frac{1}{r_0} - \frac{2\pi h\theta}{PgR} \right) + \frac{\theta}{\eta} \cdot \ln \sqrt{\frac{2\pi r_0^{3/2}\theta}{PgR}} \quad (5.13)$$

Підставляючи  $r_0 = \sqrt{\frac{P_0 g R}{2\pi h\theta}}$  з (5.10), одержимо:

$$\Omega = \frac{\theta}{2\eta} \cdot \left( \frac{P}{P_0} - 1 - \ln \frac{P}{P_0} \right) \quad (5.14)$$

враховуючи, що  $\frac{\Omega}{2\pi} = N$ , де  $N$  – число обертів зовнішнього циліндра за одну секунду отримаємо:

$$\eta = \frac{\theta}{4\pi N} \cdot \left( \frac{P}{P_0} - 1 - \ln \frac{P}{P_0} \right), \quad (5.15)$$

де  $P_0$  – мінімальний важок, який приводить систему в рух.

Для спрощення розрахунків за формулою (5.15), коли зсув шарів рідини розповсюджується не до кінця, складені таблиці (див. таблицю 5.1).

При цьому обчислення проводять за формулою:

$$\eta = \frac{\theta}{N} \cdot F\left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (5.16)$$

де

$$F\left(\frac{P}{P_0}\right) = \frac{1}{4\pi} \cdot \left( \frac{P}{P_0} - 1 - \ln \frac{P}{P_0} \right) \quad (5.17)$$

## **2. Обертальний момент:**

$$M \geq 2\pi h r_1^2 \theta \quad (5.18)$$

У цьому випадку не пружний зсув можна спостерігати по всьому шару рідини, що досліджується. Тоді маємо граничні умови:

$$\begin{cases} \omega|_{r=r_0} = 0 \\ \omega|_{r=r_1} = \Omega \end{cases} \quad (5.19)$$

Константа

$$C = \frac{PgR}{4\pi h r_0^2 \eta} + \frac{\theta}{\eta} \ln \frac{r_0}{r_1} \quad (5.20)$$

Звідки

$$\eta = \frac{1}{N} \cdot \left( \frac{gR(r_1^2 - r_0^2)}{8\pi^2 h r_0^2 r_1^2} \cdot P - \frac{\theta}{2\pi} \ln \frac{r_1}{r_0} \right) \quad (5.21)$$

Позначаючи

$$\begin{cases} K_1 = \frac{gR(r_1^2 - r_0^2)}{8\pi^2 h r_0^2 r_1^2} \\ K_2 = \frac{\ln \frac{r_1}{r_0}}{2\pi} \end{cases} \quad (5.22)$$

Одержимо

$$\eta = \frac{1}{N} \cdot (K_1 P - K_2 \theta) \quad (5.23)$$

Тепер залишилось знайти  $\theta$ , для цього у рівнянні (5.8) покладемо  $P = P_0$  і  $r = r_0$

$$\theta = \frac{P_0 g R}{2\pi h r_0^2} \quad (5.24)$$

Позначаючи

$$K_0 = \frac{Rg}{2\pi hr_0^2}, \quad (5.25)$$

будемо мати:

$$\theta = K_0 P_0 \quad (57.26)$$

Оскільки сила тертя, у підшипниках приладу, відмінна від нуля, то знайдене з досліду  $P_{0d}$  буде відрізнятися від  $P_0$ , що входить у формулу (5.15) і (5.25). Тому необхідно внести поправку на тертя у підшипника. З цією метою, користуючись кривою тертя підшипників приладу РВ-4, знаходять величину мінімального навантаження, яке викликає рух обертальної системи віскозиметра при відсутності між циліндрами дисперсної системи (масла). Тоді

$$P_0 = P_{0d} - P_{zp} \quad (5.27)$$

Величину навантаження, при якому зсув шарів, речовини що досліджується, «розповсюджується до кінця», можна визначити із співвідношення (5.10), підставляючи замість змінної величини  $r$  величину  $r_1$  (радіус зовнішнього циліндра). Тоді  $P_{zp}$  буде дорівнювати:

$$P_{zp} = \frac{2\pi hr_1^2 \theta}{gR} \quad (5.28)$$

Якщо важки, які використовуються у роботі, менше за  $P_{zp}$ , то в'язкість треба обчислювати за формулою (5.15), у протилежному випадку використовують формулу (5.22).

### ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Експериментально визначити граничне напруження зсуву  $\theta$ , використовуючи формулу (5.26).
2. Зняти криву залежності числа обертів за секунду зовнішнього циліндра від величини навантаження  $P$ .
3. Використовуючи дані про розміри приладу, розрахувати константи  $K_0, K_1, K_2$  і величину навантаження, при якому зсув шарів речовини, що досліджується буде розповсюджуватися до кінця.
4. Розрахувати динамічну в'язкість масла, враховуючи наявність тертя у підшипниках приладу. Знайти середнє значення динамічної в'язкості. Результати вимірів записати у таблицю.

Таблиця

Число обертів за секунду	Величина навантаження $P$	Динамічна в'язкість $\eta$	Середнє значення динамічної в'язкості

5. Розрахувати похибки вимірювань. Враховуючи, що похибка методу становить 10%, порівняти похибки вимірювань з похибкою методу.

## ДОДАТКОВІ ДАНІ

### Параметри приладу

Радіус зовнішнього циліндра	$r = 2 \text{ см}$
Радіус внутрішнього циліндра	$r_0 = 1 \text{ см}$
Радіус барабана	$R = 2.25 \text{ см}$
Глибина занурення внутрішнього циліндра	$h = 7.3 \text{ см}$
Вага легких чашок	0,52 г
Вага важких чашок	25,28 г

**Таблиця 5.1**

$\frac{P}{P_0}$	$F\left(\frac{P}{P_0}\right)$	$\frac{P}{P_0}$	$F\left(\frac{P}{P_0}\right)$	$\frac{P}{P_0}$	$F\left(\frac{P}{P_0}\right)$	$\frac{P}{P_0}$	$F\left(\frac{P}{P_0}\right)$
1,1	0,00903	2,3	0,03716	3,5	0,09923	5,8	0,24305
1,2	0,00140	2,4	0,04174	3,6	0,10494	6,0	0,25527
1,3	0,00299	2,5	0,04644	3,7	0,11072	6,3	0,27644
1,4	0,00505	2,6	0,05139	3,8	0,11636	7,0	0,32258
1,5	0,00752	2,7	0,05623	3,9	0,12839	7,5	0,35710
1,6	0,01034	2,8	0,06131	4,0	0,12839	8,0	0,39153
1,7	0,01348	2,9	0,06645	4,3	0,14661	9,0	0,46174
1,8	0,01688	3,0	0,07173	4,6	0,16501	10,0	0,53292
1,9	0,022054	3,1	0,07706	4,8	0,18082	11,0	0,60524
2,0	0,02441	3,2	0,08249	5,0	0,19021	12,0	0,67757
2,1	0,02849	3,3	0,08801	5,2	0,20306	13,0	0,83254
2,2	0,03275	3,4	0,09358	5,4	0,21592	14,0	0,00750
						15,0	0,97750

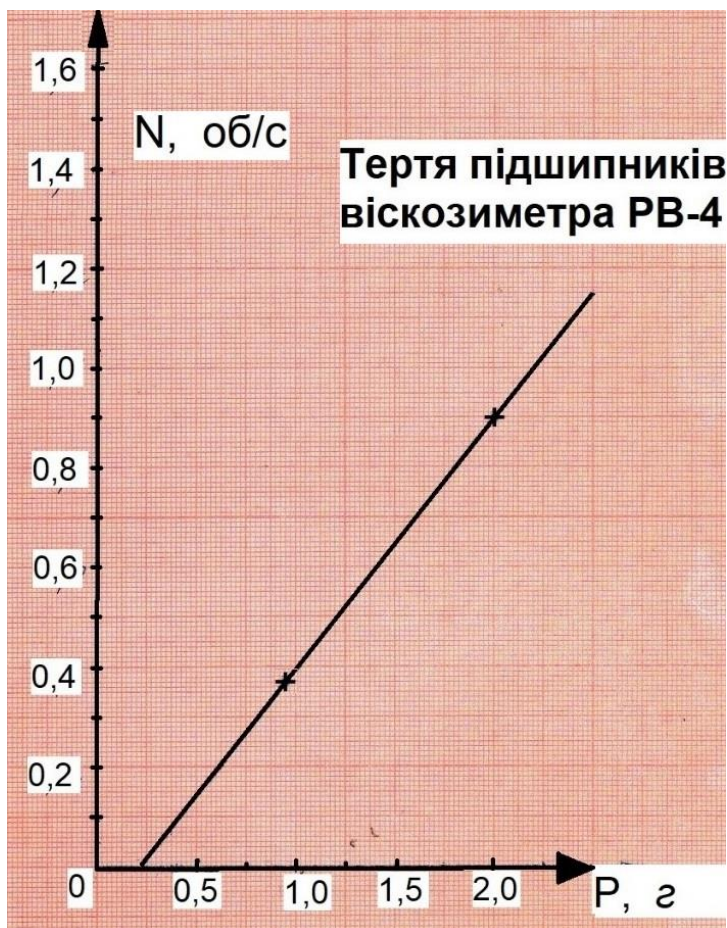


Рис. 5.6. Залежність кількості обертів в одиницю часу порожнього віскозиметра від маси важків на чашках

### Контрольні питання

1. Опишіть принцип роботи віскозиметром РВ-4.
2. Виведіть закон в'язкості Ньютона при русі по колу.
3. Які рідини називаються бінгамівськими та що така граничне напруження зсуву?
4. Запишіть рівняння Бінгама при русі рідини по колу.
5. Виведіть рівняння (5.5) залежності моменту, що утворюється пружно-в'язким опором зсуву від радіус елементарного шару.
6. Чи залежить зсувна в'язкість бінгамівської рідини від кутової швидкості?



## Лабораторна робота № 6

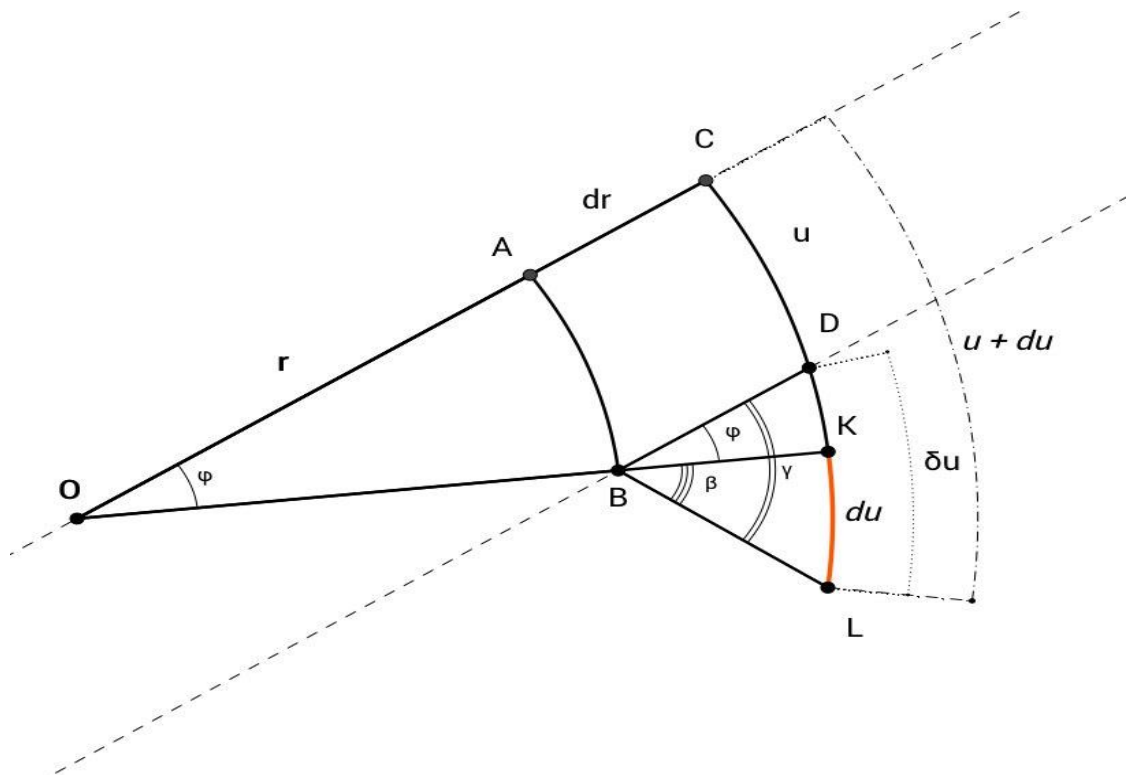
### ВИЗНАЧЕННЯ В'ЯЗКОСТІ МАСТИЛ ВІСКОЗИМЕТРОМ РВ-8

**Мета роботи:** виміряти динамічну в'язкість мастила при різних температурах.

**Прилади та обладнання:** Ротаційний віскозиметр РВ-8, набір вантажів, секундомір.

### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Розглянемо рух в'язкої рідини, яка розміщена між двома коаксіальними циліндрами, один з яких обертається, а другий нерухомий. Виділимо сегмент  $ABKC$  - фізично нескінченний малий об'єм (рис. 6.1).



**Рис. 6.1. Деформація фізично нескінченно малого об'єму при русі по колу**

Деформація фізично нескінченно малого об'єму дорівнює

$$\delta U = LC - AB = dr \left( \frac{\partial U}{\partial r} \right)$$

$$dU = \delta U - KD = dr \left( \frac{\partial U}{\partial r} \right) - \phi dr = dr \left( \frac{\partial U}{\partial r} - \phi \right) = dr \left( \frac{\partial U}{\partial r} - \frac{U}{r} \right)$$

$$CD = AB; \quad AB = r\phi; \quad KC = (r + dr)\phi;$$

$$KC = (CD + DK) \Rightarrow KD = (KC - CD) = (r + dr)\phi - AB = (r + dr)\phi - r\phi = \phi dr$$

$$\frac{dU}{dr} = \left( \frac{\partial U}{\partial r} - \frac{U}{r} \right) \quad (6.1)$$

Рівняння течії нормальних непружних рідин має вигляд:

$$\tau = \sigma_{r\varphi} = \frac{F}{S} = \eta \frac{dV}{dn} = \eta \left( \frac{\partial V}{\partial r} - \frac{V}{r} \right), \quad (6.2)$$

де  $\tau = \sigma_{r\varphi}$  – напруження зсуву (дотичне напруження);  $\eta$  - коефіцієнт в'язкості;  
 $\frac{dV}{dr}$  - градієнт швидкості.

Умова рівномірного обертання всіх циліндричних шарів полягає у тому, що обертальний та гальмівний момент, які відчуває кожний циліндричний шар, дорівнюють один одному.

$$\begin{aligned} M = Fr = (\sigma_{r\varphi} S) r = \text{const}, \quad S = 2\pi r h, \\ M = 2\pi r^2 h \eta \left( \frac{\partial V}{\partial r} - \frac{V}{r} \right) \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{M}{2\pi h \eta} = r^2 \left( \frac{\partial V}{\partial r} - \frac{V}{r} \right) \end{aligned} \quad (6.3)$$

$\omega = \frac{V}{r}$  - кутова швидкість обертання шару

$$\frac{\partial \omega}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} - \frac{V}{r^2} \Rightarrow r \frac{\partial \omega}{\partial r} = \frac{\partial V}{\partial r} - \frac{V}{r}$$

і підставляємо у рівняння (6.3). Маємо

$$\begin{aligned} r^3 \frac{\partial \omega}{\partial r} &= \frac{M}{2\pi h \eta} \Rightarrow \\ \frac{\partial \omega}{\partial r} &= \frac{M}{2\pi h \eta r^3} \end{aligned} \quad (6.4)$$

Інтегруючи (6.4), одержимо

$$\omega(r) = -\frac{M}{4\pi h \eta r^2} + C \quad (6.5)$$

Оскільки кутова частота обертання  $\omega$  при  $r = r_{\text{вн}}$ , дорівнює нулю,  $\omega|_{r_{\text{вн}}} = 0$  (умова прилипання) ( $r_{\text{вн}}$  – радіус внутрішнього циліндра I;  $r_{\text{зовн}}$  - радіус зовнішнього циліндра в см), то

$$0 = -\frac{M}{4\pi h \eta r_{\text{вн}}^2} + C, \quad (6.6)$$

$$C = \frac{M}{4\pi h \eta r_{\text{вн}}^2} \quad (6.7)$$

де  $h$  – висота рівня мастила, що заповнює простір між циліндрами.

Оскільки  $M = mgh$ , маємо

$$C = \frac{mgR}{4\pi h \eta r_{\text{вн}}^2}, \quad (6.8)$$

де  $R$  – радіус механічного блока.

Якщо є тертя, то момент буде меншим, ми це врахуємо:  
 $M = M_{тяги} - M_{тертя}$  отримуємо

$$C - \frac{mgR - M_{тертя}}{4\pi h \eta r_{вн}^2} = 0 \quad (6.9)$$

Далі й пишемо, що  $M_{тертя} = m_{тертя} gR$ . Отримаємо

$$C = \frac{(m - m_{тертя})gR}{4\pi h \eta r_{вн}^2} \quad (6.10)$$

Підставимо (6.10) у (6.5) та позначимо  $\omega_{зовн}$  - кутова швидкість обертання зовнішнього циліндру,

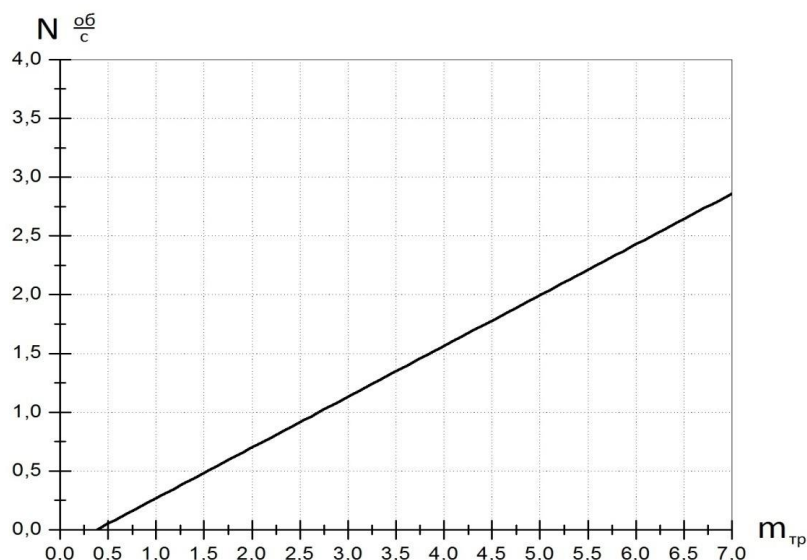
$$\omega_{зовн} = \frac{(m - m_{тертя})gR}{4\pi h \eta} \left( \frac{1}{r_{вн}^2} - \frac{1}{r_{зовн}^2} \right) = \Omega, \quad (6.11)$$

де  $\Omega$  - кутова швидкість обертання, яку ми спостерігаємо.

Вважаючи  $N = \frac{\Omega}{2\pi}$ , де  $N$  – число обертів в одиницю часу, одержимо

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{(m - m_{тертя})gR}{8\pi^2 h N} \left( \frac{1}{r_{вн}^2} - \frac{1}{r_{зовн}^2} \right) = \\ &= \frac{(m - m_{тертя})gR(r_{зовн}^2 - r_{вн}^2)}{8\pi^2 h N r_{вн}^2 r_{зовн}^2} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \eta = \frac{m - m_{тертя}}{N} k, \end{aligned} \quad (6.12)$$

де  $k = \frac{gR(r_{зовн}^2 - r_{вн}^2)}{8\pi^2 h r_{вн}^2 r_{зовн}^2}$  - константа приладу;  $m$  – маса важків на чашках приладу плюс маса чашок;  $m_{тертя}$  – поправка на тертя підшипників (див. рис. 6.2).



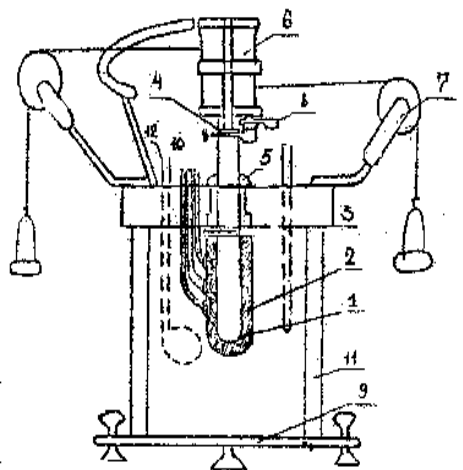
**Рис. 6.2.**  
**Залежність**  
**числа обертів**  
**в одиницю**  
**часу від**  
**поправки на**  
**тертя**  
**підшипників**

## СХЕМА ПРИЛАДУ

Зовнішній вигляд ротаційного віскозиметру РВ-8 наведений на рис. 6.3, його схема представлена на рис. 6.4.



**Рис. 6.3. Зовнішній вигляд ротаційного віскозиметра РВ-8**



**Рис. 6.4. Схема ротаційного віскозиметра РВ-8**

Ротаційний віскозиметр РВ-8 складається з двох латунних коаксіальних циліндрів **1** і **2** (рис. 6.4). Кожний циліндр внизу закінчується напівсферою. На поверхні внутрішнього циліндра **1** нанесена шкала з ціною поділок 1 мм. Внутрішній циліндр **1** через термоізоляційну муфту з'єднаний із віссю **4**, що має кульові підшипники **5**. Напрямок нарізки термоізоляційної з'єднуючої муфти протилежний напрямку обертання внутрішнього циліндра **1**. На верхню частину циліндра **2** насаджена на гумову підкладку муфта, що запобігає попаданню у циліндр рідини, яка охолоджує. На шків **6** намотуються шовкові нитки (хірургічний шовк №8) та перекидаються через блоки **7**. Шків щільно прикріплюється до вісі з таким розрахунком, щоб він не зміщувався при прикладенні важка, що дорівнює 8 кг. Гальмо **8** слугує для зупинки та запуску оберальної системи приладу. Циліндрична посудина **3** віскозиметра входить верхньою частиною у виточку муфти і закріплюється штифтами. Осі циліндрів віскозиметра повинні точно співпадати. До кінців ниток прикріплюються зважені гачки (вага гачка додається до ваги вантажу), до кожного гачка підвішується приблизно однаковий за вагою вантаж. Загальна вага вантажу не має перевищувати 8 кг. Основна плита **9** приладу виготовляється з текстоліту. Циліндр **2** має ззовні плоску основу для того, щоб його можна було поставити, коли він вийнятий із муфти.

Для виміру температури служать три мідно-константанові термопари **10**, які змонтовані у циліндрі **2**. Спаї цих термопар переміщуються у шарі досліджуваної речовини. Рівень досліджуваної речовини у зазорі між циліндрами має бути вище за верхню термопару.

Дозволяється вимірювання температури мастила термометром, що поміщений у рідину, яка охолоджується. Термометр встановлюється в отвір, що знаходиться на плиті **3**. Циліндри віскозиметра під час виміру розміщуються всередині термостата. Останній являє собою латунну посудину **12**, ізольовану войлоком і азбестом. У латунну посудину **12** наливають термостатну рідину (спирт, керосин). Для отримання низьких температур від 0 до -60°C кидають у термостатну рідину невеликі шматочки твердої вуглекислоти. Рідину у термостаті перемішують мішалкою **11**.

### ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Навантажити чашки, які обертають циліндр віскозиметра, послідовно вантажами 20, 50, 100, 200 г. На обидві чашки розміщувати однакові за вагою вантажі.
2. Виміряти секундоміром час трьох обертів барабану для різних вантажів.
3. Включити електричний підігрів (не більше ніж на одну хвилину) і почекати 15-20 хвилин, доки система нагріється (при цьому піч має бути виключена). Проводити виміри тільки при температурі, що встановилася.
4. Провести виміри при 3-4 наступних температурах.
5. Знаючи сталу приладу, розрахувати в'язкість мастила при всіх температурах за формулою (6.12).
6. Побудувати за методом найменших квадратів графік температурної залежності в'язкості циліндрового мастила.
7. Розрахувати похибки досліду.

### ДОДАТКОВІ ДАНІ

Стала приладу

$$k = 0,372 \frac{1}{\text{см} \cdot \text{с}^2}$$

$$r_{\text{вн}} = 1,605 \text{ см}$$

$$r_{\text{зовн}} = 1,905 \text{ см}$$

$$R = 2,235 \text{ см}$$

$$h = 7 \text{ см (висота рівня мастила в приладі)}$$

Для більшої точності чашки потрібно зважувати.

Маса чашок – 32,72 г.

### Контрольні питання

1. Опишіть принцип роботи віскозиметром РВ-8.
2. Запишіть реологічне рівняння в'язкої рідини.
3. Виведіть закон в'язкості Ньютона при русі по колу для нестисливої рідини.
4. Виведіть залежність кутової швидкості ньютонівської рідини при русі по колу від радіусу.
5. Дайте визначення зсувної в'язкості? Яких характер залежності зсувної в'язкості від температури?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7

# ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ В'ЯЗКОСТІ РІДИННИХ СИСТЕМ ЗА ДОПОМОГОЮ РОТАЦІЙНОГО ВІСКОЗИМЕТРА *ViscoQC 100*

### Мета роботи:

- ознайомитись із принципом роботи ротаційного віскозиметра *ViscoQC 100*;
- отримати температурні залежності в'язкості для рідинних систем за допомогою ротаційного віскозиметра *ViscoQC 100*;
- проаналізувати отримані експериментальні залежності в'язкості досліджених рідин від температури.

**Прилади та обладнання:** ротаційний віскозиметр *ViscoQC 100*, розчини рідин.

## ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

В'язкість є однією з найважливіших реологічних властивостей, яка відіграє ключову роль у прогнозуванні поведінки будь-якої рідини. Вона визначає внутрішній опір рідини до течії та деформації під дією зовнішніх сил.

Розуміння в'язкості є надзвичайно важливим для передбачення характеру руху рідини у різних технологічних та природних процесах. Наприклад, у фармацевтиці в'язкість впливає на ефективність та зручність використання лікарських засобів, у медицині ж, в'язкість крові є важливим показником здоров'я людини, оскільки від неї залежить ефективність кровообігу.

З точки зору реології кожна рідинна система має власні характерні властивості та поведінку під час течії, деформації або дії зовнішніх навантажень. Це означає, що різні рідинні системи реагують на зовнішні сили по-різному, залежно від своєї внутрішньої структури, складу та фізико-хімічних властивостей. Деякі матеріали можуть текти легко та рівномірно, тоді як інші демонструють складнішу поведінку, змінюючи свою в'язкість або структуру залежно від умов, у яких вони перебувають. Залежно від того, як в'язкість рідини змінюється під впливом швидкості зсуву, напруги, історії деформації та інших факторів, рідини класифікують на ньютонівські та неньютонівські. Ньютонівські рідини характеризуються постійною в'язкістю незалежно від прикладеної сили або швидкості зсуву. У них існує лінійний зв'язок між напругою зсуву та швидкістю деформації, що спрощує прогнозування та моделювання їх поведінки у різних процесах. Неньютонівські рідини, навпаки, демонструють більш складну поведінку залежно від умов, у яких вони перебувають. На відміну від ньютонівських рідин, неньютонівські рідини можуть змінювати свою в'язкість під впливом зовнішніх сил. Це призводить до цілого спектру властивостей, характерних для неньютонівських рідин, наприклад, дилатансія (загусання під дією зсуву), розрідження під дією зсуву, в'язкопластичності і тиксотропії (зменшення в'язкості з часом дією зсуву).

Опис течії рідин залишається однією з основних задач у гідродинаміці та реології. Сьогодні існує велика кількість теоретичних, «напівтеоретичних» та емпіричних рівнянь для коефіцієнта динамічної в'язкості  $\eta$  проте майже кожна модель коректно описує лише обмежену частину експериментальних даних. В

їх основі лежать різні вихідні фізичні припущення, що призводить до обмежень у застосуванні кожної конкретної моделі. Деякі підходи не охоплюють різних структурних перебудов, інші — чутливі до присутності домішок чи не працюють в околі фазових переходів, а складні композиційні матеріали нерідко потребують комбінації декількох залежностей.

Поштовхом для розвинення теоретичних підходів, що дозволили адекватний опис температурної залежності в'язкості, була модель Арреніуса для залежності швидкості хімічної реакції від температури

$$k(T) = k_0 \exp\left(\frac{-E}{RT}\right). \quad (7.1)$$

Виявилось, що багато температурно залежних хімічних і фізичних процесів поведуться відповідно до рівнянь, подібних до рівнянь Арреніуса. Такі спостереження призвели до розвинення багатьма фізиками (Раман, Ейрінг, Шеппард) подібних підходів до опису в'язкості та появи моделі Френкеля-Андрате:

$$\eta(T) = \eta_{\infty} \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right). \quad (7.2)$$

У цій моделі плин рідини розглядається як «активаційний» процес: молекули повинні подолати середній енергетичний бар'єр  $E_a$  (такий підхід певним чином схожий на той, що застосовується при визначенні швидкості хімічної реакції). Чим вища  $T$ , тим більша частка молекул має енергію, достатню для стрибка, і, відповідно,  $\eta$  спадає експоненційно. Енергія активації  $E_a$  в моделі вважається сталою, тому  $(\ln \eta)$  лінеаризується щодо  $\frac{1}{T}$ .

Перевагами цієї моделі є мінімум параметрів та простота екстраполяції. Однак, така простота призводить і до ряду недоліків, наприклад, модель не враховує зміни мікроструктури і, як наслідок, дає похибки поблизу фазових переходів і переходів склування, де бар'єр змінюється з температурою.

Одна з моделей, що базується на аналізі характерних часів колективної динаміки склоформуючих рідин як у низькомолекулярних, так і у макромолекулярних системах поблизу та вище температури склування та вирішує питання розбіжності з експериментальними даними при дослідженні температурної залежності в'язкості в околі температури склування – модель Фогеля-Фульчера-Таммана:

$$\eta(T) = \eta_0 \exp\left(\frac{E_{VFT}}{T - T_0}\right). \quad (7.3)$$

Модель (7.3) є дещо схожою на (7.2), але при цьому дозволяє опис експериментальних даних при відхиленні від лінійного характеру залежності  $(\ln \eta)$  від  $\frac{1}{T}$ . Водночас, необхідно зауважити відсутність однозначного фізичного пояснення підгоночних параметрів  $\eta_0$ ,  $E_{VFT}$  та  $T_0$ , що входять в рівняння (Параметр  $E_{VFT}$  пов'язують із енергією «фрагментарного» руху ланцюгів, а  $T_0$  - з гіпотетичною температурою, де об'єм вільного простору занулюється).

Також існують специфічні моделі саме для неньютонівських рідин. Враховуючи залежність в'язкості цього класу рідин від швидкості зсуву, майже

всі такі моделі включають в себе цей параметр. Однією з найбільш розповсюджених є степенева модель Оствальда

$$\eta = K(T)\dot{\gamma}^{n-1}, \quad (7.4)$$

де температурна залежність коефіцієнту консистенції  $K(T)$  зазвичай має форму закону Арреніуса

$$K(T) = K_0 \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right). \quad (7.5)$$

При цьому значення індексу течії (або показника поведінки)  $n$  визначає тип рідини. Так, значення  $n = 1$  відповідає ньютонівській рідині, в той час як випадок  $0 < n < 1$  відповідає рідині, в якій в'язкість зменшується при навантаженні (псевдопластична рідина), а  $n > 1$  — рідині, в якій в'язкість збільшується при навантаженні (ділатантна рідина). Ця модель є достатньо простою і описує широкий клас неньютонівських рідин. Водночас модель (7.4) має і ряд недоліків. Так, відсутнє фізичне пояснення поведінки моделі при граничних значеннях швидкості зсуву (кілька суттєвих недоліків: відсутність фізичного змісту при граничних значеннях швидкості зсуву ( $\dot{\gamma} \rightarrow 0$  і  $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$ ), також модель в певних випадках дає значні похибки в описі експериментальних даних, які виникають через лінійну апроксимацію нелінійних кривих течії в логарифмічних координатах. Це знижує точність реологічних розрахунків. Очевидно, що ці фактори сприяли появі більш складних (як емпіричних, так і теоретично обґрунтованих) моделей, що описують псевдопластичну поведінку рідин, наприклад, Кареу-Ясуда, Крос, Сіско, Гершель-Балклі та інші.

## ОПИС ПРИЛАДУ

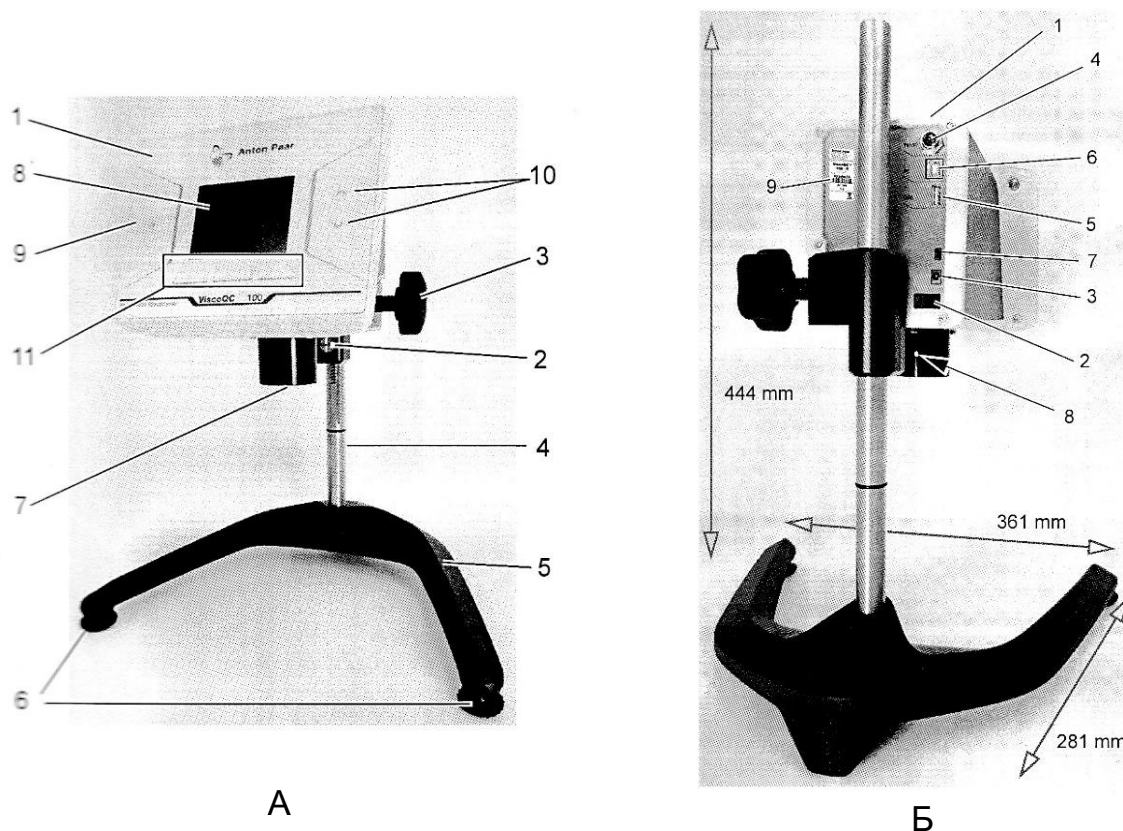
Зовнішній вигляд ротаційного віскозиметра *ViscoQC 100* наведений на рис. 7.1.



**Рис. 7.1. Зовнішній вигляд віскозиметра *ViscoQC 100***



Ротаційний віскозиметр *ViscoQC 100* (рис. 7.2) являє собою цифровий ротаційний віскозиметр початкового рівня, який вимірює динамічну в'язкість у вигляді одноточкового значення, призначений для вимірювання коефіцієнта в'язкості рідин та рідинних систем і, зокрема, медико-біологічних.



**Рис. 7.2. Будова віскозиметра *ViscoQC 100* (пояснення в тексті)**

Віскозиметр складається з (див. рис.7.2.А):

- 1 – Вимірювальна голівка *ViscoQC*
- 2 – Фіксатор вимірювальної голівки
- 3 – Ручка налаштування положення вимірювальної голівки по висоті
- 4 – Штатив
- 5 – База штативу
- 6 – Регулювальні гвинти для вирівнювання приладу
- 7 – Магнітна муфта для встановлення шпінделя
- 8 – Екран
- 9 – Кнопка Старт/Стоп для початку і зупинки вимірів
- 10 – Кнопки для навігації по меню на екрані
- 11 – Кнопки вибору контекстних меню (три штуки) – виконують функцію, що відображена над кожною з кнопок

На рис.7.2.Б:

- 1 – Вимірювальна голівка *ViscoQC*
- 2 – Кнопка ввімкнення живлення
- 3 – Вхід для підключення кабеля живлення
- 4 – Порт для підключення температурного датчика Pt100 (опціонально)

- 5 – Порт USB – для підключення USB принтера або оновлення програмного забезпечення з зовнішнього носія. Запис даних на USB носій неможливий
- 6 – Порт для підключення комп'ютера (для програми V-Collect)
- 7 – Шина CAN для підключення додаткових модулів
- 8 – Кріплення для встановлення захисту шпінделя або вимірювальної ємності з фланцевим кріпленням
- 9 – Шильд з серійним номером приладу

## **ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ**

1. Увімкнути віскозиметр кнопкою 2 (рис. 7.2.Б) та пересвідчитись, що прилад встановлений горизонтально. За необхідності провести регулювання за допомогою гвинтів 6 (рис. 7.2.А). Червоний колір означає, що потрібне коригування положення, жовтий – іде процес стабілізації, зелений – прилад встановлено горизонтально. Для підтвердження положення натиснути праву кнопку 11 (рис. 7.2.А).

2. Без встановленого шпінделя запустити калібрування нуля правою кнопкою 11 (рис. 7.2.А) та дочекатися підтвердження завершення операції на екрані.

3. Налити необхідну кількість досліджуваної рідини в посудину. При цьому необхідно врахувати, що наконечник шпінделя має знаходитися щонайменше на 10 мм вище дна посудини, а сам шпindel повинен бути занурений до позначки на його стрижні.

4. Повільно занурте шпindel у посудину із зразком. Дископодібні шпінделі нахилляйте, щоб уникнути утворення повітряних бульбашок на нижньому боці шпінделя.

5. Помістіть посудину із зразком під вимірювальну головку. Повільно опустіть вимірювальну головку, поки вона майже не торкнеться шпінделя. Підтягніть шпindel вгору і зафіксуйте його на вимірювальній головці за допомогою магнітної муфти 7 (рис. 7.2.А).

6. Відрегулюйте висоту вимірювальної головки: занурте шпindel, поки рівень зразка не досягне позначки (невеликого заглиблення) на стрижні шпінделя. Відкоригуйте положення посудини із зразком: шпindel має бути розташований по центру.

7. Провести налаштування режиму вимірів. Для цього кнопками 10 (рис. 7.2.А) вибрати пункт меню «Режим» та натиснути кнопку 11 <Ввести> (рис. 7.2.А) для вибору. Кнопками 10 (рис. 7.2.А) вибрати режим «TruMode (AM)» та цільовий час 20 с. За необхідності, встановити інше значення цільового часу, враховуючи, що для коректних вимірів за цей час повинно впроходити не менше 5-ти повних обертів шпінделя.

8. Ввімкнути термостат. Встановити температуру першого виміру і почекати, доки система нагріється. Проводити виміри тільки при температурі, що встановилася.

9. Натиснути <Старт>, щоб розпочати вимірювання. Зачекати, поки індикатор виконання зміниться з червоного, рухомого з показом "Підготовка" на червоний з показом "Вимірювання", а потім на зелений з показом "Готово". Якщо з'явиться попередження про необхідність змінити розмір шпінделя – виконати пункти 4-6 для іншого шпінделя.

10. Зчитати покази для динамічної в'язкості та занести в таблицю разом з відповідною температурою.

**Таблиця**

Температура, °C	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
<b>Динамічна в'язкість</b>													

11. Натиснути кнопку 11 <Додому> (рис. 7.2.А) щоб розморозити екран, та повторити пункти 8-11 для всіх досліджуваних температур (від 20 до 80°C з кроком 5°C).

12. Від'єднати шпindel, відставити посудину із зразком і витягнути деталі з речовини для очищення.

13. Побудувати графік залежності середнього коефіцієнту в'язкості від температури:  $\bar{\eta} = f(T)$ . Провести апроксимацію за формулами (7.2) та (7.3).

Порівняти результати

14. Зробити висновки.

### **Контрольні питання.**

1. Дайте визначення в'язкості рідини. Вкажіть одиниці вимірювання.
2. Дайте визначення ньютонівської і неньютонівської рідини. Поясніть, чому кров є неньютонівською рідиною.
3. Що таке явища дилатансії та тиксотропії? Для якого типу рідин вони характерні?
3. Перерахуйте методи визначення в'язкості рідини. Якими методами можна визначати в'язкість крові?
4. Поясніть, яким методом визначається в'язкість рідини у даній лабораторній роботі.
5. Як змінюється в'язкість неньютонівських рідин з підвищенням температури, і чому?
6. Які фактори, крім температури, можуть впливати на в'язкість рідини?
7. Які математичні моделі використовуються для опису температурної залежності в'язкості рідин?
8. Як можна використовувати результати вимірювань в'язкості рідинних систем для визначення параметрів, таких як енергія активації?

## Лабораторна робота № 8

### **ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИМ МЕТОДОМ ТА ТЕРМОМЕТРОМ ОПОРУ**

**Мета роботи:** ознайомитись з методами вимірювання температури.

**Завдання:**

- Вивчення чотирьох методів вимірювання температури: за допомогою термометра розширення, мідного термометра опору, напівпровідникового термістора з негативним термічним коефіцієнтом опору та термопари.
- Градування термопари. Побудова графіка.
- Градування термометра опору. Побудова графіка.
- Вимірювання температури термопарою та термометром опору.

**Прилади та обладнання:** термостат, мілівольтметр, термометр опору, диференційна термопара, термістор, набір ртутних термометрів.

### **КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ**

Поняття температури є одним з найважливіших понять в науці та техніці. Температура – фізична величина, яка характеризує ступінь нагрітості тіл і є мірою кінетичної енергії теплового руху в них. Температурою характеризують системи які знаходяться в рівноважному стані, тобто коли в системі відсутні макропотоки.

Виміряти температуру безпосередньо неможливо; можна визначити її значення тільки за деякими іншими фізичними параметрами тіла, які змінюються однозначно в залежності від температури. Такими параметрами є, наприклад, об'єм, довжина, електрична провідність, яскравість тощо.

На сучасний момент в різних областях науки та промисловості застосовують десятки різноманітних способів вимірювання температури.

Засіб для вимірювання температури, призначений для виробництва сигналу в формі, зручній для сприйняття спостерігачем, автоматичної обробки, передачі та використання в автоматичних системах управління називається термометром.

У таблиці 8.1 наведені відомості про найпоширеніші засоби вимірювання температури.

**Таблиця 8.1**

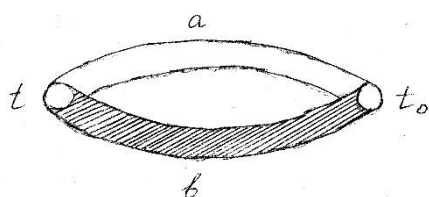
**Межі застосування засобів вимірювання температури**

Тип засобу вимірювання	Різновидність засобу вимірювання	Межі вимірювання температури, °C	
Термометри розширення	Рідинні скляні	-200	+600
	Манометричні	-200	+1000
Термометри опору	Металічні	-260	+1100
	Напівпровідникові	-272	+600
Термоелектричні термометри		-200	+2200
Пірометри		-50	+3500

Найбільш поширені – **термометри розширення**. Принцип дії цього класу термометрів ґрунтується на розширенні термометричної рідини в залежності від температури. Серед рідинних термометрів розширення найбільш розповсюдженими є ртутні скляні термометри. Хімічно чиста ртуть як термометрична речовина має цілий ряд позитивних рис: вона лишається рідиною в широкому інтервалі температур, не змочує скло, легко може бути одержана у чистому вигляді. Скляні рідинні термометри мають такі переваги: висока точність вимірювання, простота, дешевизна. Недоліками цих термометрів є відносна погана видимість шкали, практична неможливість передачі показів на відстань, неможливість автоматичної реєстрації показів, неможливість ремонту.

Застосування **термоелектричних термометрів** для вимірювання температури ґрунтується на залежності термоелектрорушійної сили (ТЕРС) термопари від температури. Термопара – це найпростіше термоелектричне коло із двох різнорідних провідників, кінці яких електрично з'єднані. Термопара має властивість розвивати ТЕРС при різниці температур в місцях з'єднання провідників.

Сучасна фізика пояснює термоелектричні явища таким чином. З одного боку, внаслідок різниці рівнів Фермі в різних металах при їх з'єднанні виникає контактна різниця потенціалів. З іншого боку, концентрація вільних електронів в металах залежить від температури в провіднику. При наявності різниці температур в провіднику виникає дифузія електронів, яка призводить до утворення електричного поля. ТЕРС складається з суми потенціалів в контактах термопари і залежить від роду провідників та від температури контактів.

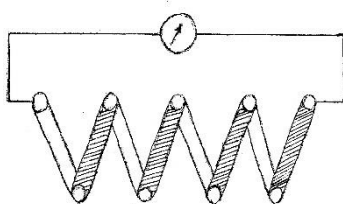


**Рис. 8.1. Термоелектричне коло**

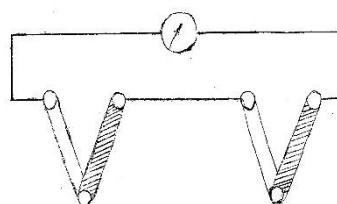
Якщо в колі (рис. 8.1) температури місць з'єднання провідників  $a$  та  $b$  будуть однаковими, то й різниці потенціалів будуть однаковими за значеннями, проте матимуть протилежні знаки, а сумарна ТЕРС і струм в колі будуть дорівнювати нулеві.

Якщо ж  $t \neq t_0$ , то сумарна ТЕРС та струм в колі не будуть дорівнювати нулеві. Щоб отримати однозначну залежність ТЕРС від температури, необхідно температуру одного з контактів підтримувати постійною. Для вимірювання ТЕРС в коло термоелектричного термометра включають вимірювальний прилад.

Для розв'язання окремих задач вимірювання температури застосовуються різноманітні способи з'єднання термоелектричних термометрів. Найбільш вживані серед них – термобатарея (рис. 8.2) та диференційна термопара (рис. 8.3).



**Рис. 8.2. Термобатарея**



**Рис. 8.3. Диференційна термопара**

При використанні термобатареї застосовують послідовне з'єднання декількох термопар, що дозволяє збільшувати коефіцієнт перетворення термоелектричного термометра. ТЕРС, що розвиваються термопарами, додаються. Таке включення застосовується при малих різницях температур робочого  $t$  та вільного  $t_0$  кінців. Однак термобатарея не підвищує точності вимірювань.

Для вимірювання різниці температур у двох точках робочий спай термопари розташовують в одній з точок, інший спай – у точці з відомою температурою. Як правило, такою температурою є температура суміші води та льоду  $0^{\circ}\text{C}$ . У цьому випадку ТЕРС, що розвивається термометром, буде визначатись температурами робочого спаю  $t_1$  та відомої температури  $t_2$ .

Будова термоелектричних термометрів. Два будь-яких різнорідних провідника можуть утворювати термоелектричний термометр. До матеріалів, які застосовуються для виготовлення термоелектричних термометрів, висувається ряд вимог: жаростійкість, жароміцність, відтворюваність, стабільність тощо. До обов'язкових вимог відносять стабільність градувальної характеристики та відтворюваність. Деякі характеристики термоелектричних термометрів наведені в таблиці 8.2.

**Таблиця 8.2**

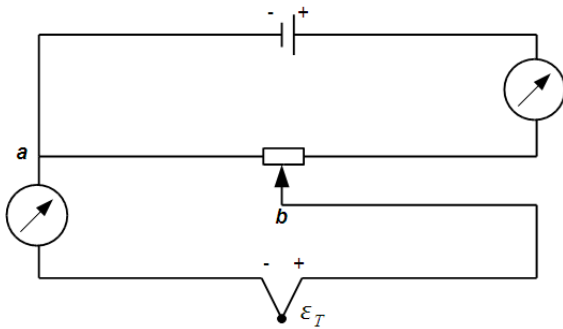
**Характеристики термоелектричних термометрів**

Тип термопари	Робочий діапазон температур, $^{\circ}\text{C}$	Максимальна температура, $^{\circ}\text{C}$
Мідь - копелева	-200 ... +100	+900
Залізо - міднонікелева	-200 ... +700	+900
Хромель - копелева	-50 ... + 600	+800
Нікельхром - міднонікелева	-100 ... +700	+900

Робочий спай термоелектричного термометра виготовляється шляхом зварки, спайки або скрутки. Для захисту термоелектродів від дії зовнішнього середовища, їх поміщують у захисний чохол.

У даній роботі для виготовлення термопари використовують зварку. Проводи скручують, поміщують між електродами та підводять до них змінний струм. Між електродами виникає електрична дуга, яка й зварює два провідника.

Методи вимірювання термоЕРС. Найбільш вживаним є компенсаційний метод вимірювання, який ґрунтується на зрівноваженні вимірюваної ЕРС падінням напруги, значення якого може бути визначено. На рис. 8.4 зображений найпростіший варіант компенсаційного методу.



**Рис. 8.4. Компенсаційний метод вимірювання термоЕРС**

Переміщуючи рухому частину дільника, можна знайти положення, коли  $U_{ab} = \varepsilon_T$ . В цьому випадку термоЕРС  $\varepsilon_T$  буде зрівноважена падінням напруги  $U_{ab}$ , струм в ланцюзі джерела термоЕРС буде відсутній і нуль-гальванометр буде показувати нуль. Щоб визначити значення термоЕРС  $\varepsilon_T$ , треба визначити падіння напруги:

$$U_{ab} = IR_{ab}.$$

Головна перевага цього методу – це те, що результати вимірювання не залежать від опору ланцюга термоелектричного термометра.

У даній роботі використовується універсальний вольтметр, який дозволяє безпосередньо вимірювати термоЕРС. Порівняно з компенсаційним методом такий метод вимірювання має ряд недоліків: результати вимірювання залежать від опору кола термоелектричного термометра, виникає похибка внаслідок невідповідності температури вільних кінців термоелектричного термометра градуувальному значенню.

**Термометри опору.** Принцип дії термометрів опору ґрунтується на властивості металів, сплавів та напівпровідників змінювати свій електричний опір із зміною температури. Опір металів та сплавів пов'язаний із розсіюванням електронів провідності на теплових коливаннях кристалічної решітки та на структурних неоднорідностях. У першому наближенні температурна залежність опору металів та сплавів описується виразом

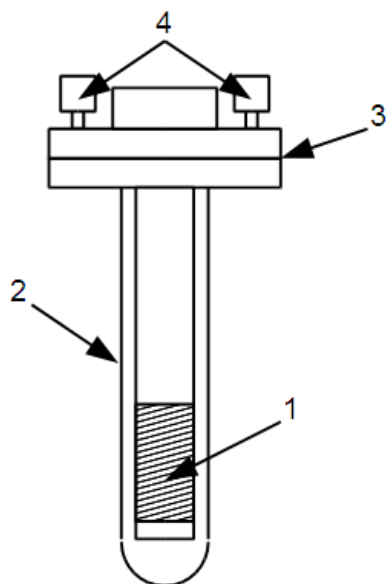
$$R(t) = R(t_0)[1 + \alpha(t - t_0)], \quad (8.1)$$

де  $R(t)$  - опір провідника при температурі  $t$ ,  $R(t_0)$  - опір провідника при деякій початковій температурі  $t_0$ ,  $\alpha$  - термічний коефіцієнт опору. За початкову температуру  $t_0$  часто обирають  $0^\circ\text{C}$ . Термічний коефіцієнт опору  $\alpha$  металів та сплавів є додатним – опір зростає зі збільшенням температури.

Опір напівпровідникових термісторів зі зростанням температури зменшується. Тому термістори є датчиками температури з негативним коефіцієнтом опору. Зміна опору термісторів  $R(T)$  з температурою пов'язана зі зміною кількості носіїв струму і описується виразом

$$R(T) = R_0 \exp \left[ \frac{U}{k_B T} \right], \quad (8.2)$$

де  $T$  - абсолютна температура термістора,  $R_0$  - опір термістора при деякій початковій температурі,  $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К - стала Больцмана,  $U$  - енергія активації утворення носія струму. За початкову температуру часто обирають  $+25^\circ\text{C}$ .



**Рис. 8.5. Металевий термометр опору**

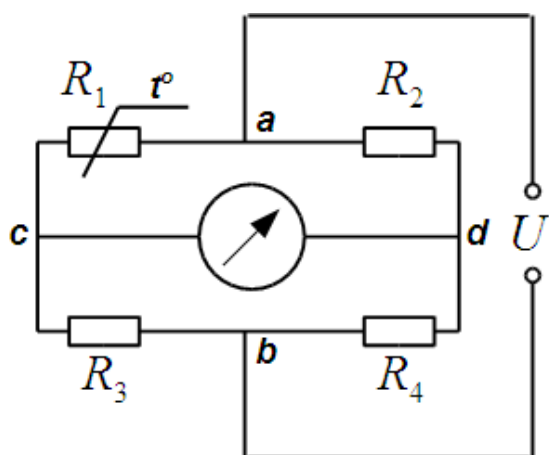
На рис. 8.5 зображений металевий термометр опору. Він складається з чутливого елемента 1, що виконаний у вигляді спіралі з дроту, яку вміщено у скляний захисний корпус 2. На кінці захисного корпусу знаходиться з'єднувальна голівка 3. В голівці знаходиться ізоляційна колодка з гвинтами 4 для кріплення виводів термометра та підключення з'єднувальних проводів.

Матеріал для виготовлення чутливого елемента повинен бути хімічно інертним, при нагріванні не змінювати своїх фізичних властивостей та не окислюватись при взаємодії з оточуючим середовищем. Бажано, щоб температурний коефіцієнт опору був значним і залежність опору від температури повинна бути простою – бажано лінійною. До матеріалів, які задовольняють цим вимогам, належать такі

метали: платина, мідь, залізо, нікель. В роботі використовується мідний термометр опору зі спеціально підготовленого мідного дроту. Мідь – недорогий метал, має досить великий температурний коефіцієнт опору  $\alpha = 0,0043 \div 0,0044 K^{-1}$ . В інтервалі від  $-50^\circ C$  до  $+180^\circ C$  температурна залежність опору міді досить точно описується лінійною функцією (8.1).

Напівпровідниковий термометр опору виготовлений за схемою, аналогічною зображеній на рис. 8.8, з тією різницею, що захисний кожух виготовлений з гнучкого пластику та має на кінці металеву гільзу для покращення теплопередачі.

### **Методи вимірювання опору та способи вмикання термометрів**



**Рис. 8.6. Мостова схема вимірювання опору**

Найбільш точними схемами вимірювання опорів є **мостові схеми** (рис. 8.6). Вимірювальний міст являє собою чотири резистори  $R_1, R_2, R_3, R_4$ , які живляться від джерела живлення  $U$ , що включене в діагональ  $a-b$  мосту. У другу діагональ  $c-d$  включений вимірювальний прилад.

Можливі два режими роботи мосту:

– рівноважний, коли зміною опору одного або декількох резисторів досягають виконання умови  $I=0$ , яка має місце, коли  $R_1 R_4 = R_2 R_3$ ;



– нерівноважний, коли  $I = f(U_1 R_1, R_2, R_3, R_4, R_r)$ . У цьому режимі, коли потрібно однозначно знати залежність вимірюваного струму  $I$  від опору резистора  $R_1$ , необхідно, щоб всі інші елементи схеми мали постійне значення.

У даній роботі використання універсального мультиметра дозволяє безпосередньо вимірювати опір термометра з доволі високою точністю. Однак, при такому включенні необхідно враховувати опір з'єднувальних проводів.

### ОПИС УСТАНОВКИ

У роботі вивчаються чотири методи вимірювання температури – термометром розширення, мідним термометром опору, напівпровідниковим термістором з негативним термічним коефіцієнтом опору та термопарою.

Установка складається з термостату, вимірювальним приладом є застосовується універсальні цифрові мультиметри, які дозволяють вимірювати опір з точністю 0,1 Ом, а напругу – з точністю  $10^{-4}$  В. Температура в термостаті контролюється термометром розширення з точністю  $\pm 1$  К. Термометр опору та термопара закріплені на кришці з гетинаксу.

### ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Експериментально отримати температурну залежність опору та термоЕРС в інтервалі температур  $20^\circ\text{C} - 95^\circ\text{C}$  через кожні  $3^\circ$ .

2. Побудувати графіки залежностей  $U = f(t)$  та  $R = f(t)$ . Графік температурної залежності термістора побудувати у змінних  $\ln(R)$  та  $1/T$ . Методом найменших квадратів апроксимувати прямими лініями отримані графіки (метод найменших квадратів описаний у рекомендованій літературі). Для розрахунків коефіцієнтів лінійної залежності  $Y = mX + c$  можна використати формули:

$$D = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2, \quad (8.3)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad (8.4)$$

$$m = \frac{1}{D} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) Y_i, \quad (8.5)$$

$$c = \bar{Y} - m\bar{X}, \quad (8.6)$$

де  $\bar{X}$ ,  $\bar{Y}$  – середні значення величин  $X$  та  $Y$ ;  $Y$ ,  $Y_i$  – поточні значення величин  $X$ ,  $Y$ .

3. З отриманих значень коефіцієнтів температурної залежності опору термістора визначити енергію активації утворення носія заряду.

4. Розрахувати похибки вимірювань.

## ПОХИБКИ ВИМІРЮВАНЬ

Основними джерелами похибок вимірювання температури термопарами є:

- похибка у визначенні градувальної характеристики (допустиме відхилення термоЕРС хромель-алюмелевої термопари у діапазоні температур складає  $\pm 0,16 \text{ мВ}$ );

- похибка від вимірювання температури вільних кінців термопари;

- термоелектрична неоднорідність термопар;

- електропровідність ізоляції;

- похибки, що залежать від умов вимірювання.

Основна похибка приладу при вимірюванні термоЕРС цифровим мультиметром визначається за формулою

$$\Delta U = [\Delta U_{\min} + KU_{\max} / 100], \quad (8.7)$$

де  $\Delta U_{\min}$  – одиниця найменшого розряду індикації приладу,  $U_{\max}$  – верхня границя діапазону вимірювання приладу,  $K$  – клас точності.

Основними джерелами похибок вимірювання температури термометром опору є:

- похибки, які залежать від термометра та з'єднувальної лінії. Цю похибку можна зменшити, включивши термометр за двопровідною схемою або застосувавши мостову схему;

- похибки, які залежать від вторинного приладу;

- неоднорідність матеріалу, з якого виготовлений чутливий елемент термометру опору.

Основна похибка приладу при вимірюванні опору визначається за формулою

$$\Delta R = [\Delta R_{\min} + KR_{\max} / 100], \quad (8.8)$$

де  $\Delta R_{\min}$  – одиниця найменшого розряду індикації приладу,

$R_{\max}$  – верхня границя діапазону вимірювання приладу,

$K$  – клас точності.

## Контрольні питання

1. Дайте визначення температури?
2. Які шкали вимірювання температури існують?
3. Які існують методи вимірювання температури?
4. Принцип роботи термопари.
5. Принцип роботи термометра опору?
6. В якому діапазоні температур працює термопара та термометр опору?
7. Методи вимірювання ЕРС та опору.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №9

### ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОТИ ПЛАВЛЕННЯ БІОПОЛІМЕРІВ, ЩО КРИСТАЛІЗУЮТЬСЯ

#### Мета роботи:

1. Ознайомитись з будовою та принципом дії дериватографа Q-1500.
2. Дослідити температурну залежність ТГ, ДТГ та ДТА.
3. Визначити температуру плавлення та питому теплоту плавлення кристалічного та частково-кристалічного біополімеру.
4. Визначити кількість вільної і зв'язаної води в біополімері та рідинній системі.

**Прилади та обладнання:** дериватограф Q-1500, зразки для дослідження.

#### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Для дослідження кінетичних закономірностей не ізотермічних процесів у різних системах застосовують такі термоаналітичні методи, як калориметрія, дилатометрія, диференціальний термічний аналіз, дериватографія, динамічна термогравіметрія й ін.

**Динамічна термогравіметрія** - найбільш інформативний метод, оскільки дозволяє робити водночас виміри температури випробуваного зразка (Т), виміри його маси (ТГ), швидкості зміни маси (ДТГ), зміни ентальпії (ДТА).

**Термогравіметрія (ТГ)** - це метод термічного аналізу, при якому реєструється зміна маси в залежності від температури. ТГ-крива дає інформацію про термостабільності і склад зразка в початковому стані, що утворюються на проміжних стадіях процесу, і про склад залишку, якщо такий мається. Цей метод буде ефективним лише за умови, що зразок виділяє летучі речовини в результаті різних фізичних і хімічних процесів.

**Диференціальна термогравіметрія (ДТГ)** - це метод термічного аналізу, при якому реєструється похідна зміни маси в часі  $\frac{dm}{dt}$  у вигляді функції

температури чи часу, тобто  $\frac{dm}{dT} = f(T)$  чи  $\frac{dm}{dt} = f(t)$ .

Отримана крива являє собою першу похідну кривої зміни маси. Замість східчастої кривої одержують ряд піків, площа під якими пропорційна абсолютній зміні маси зразка.

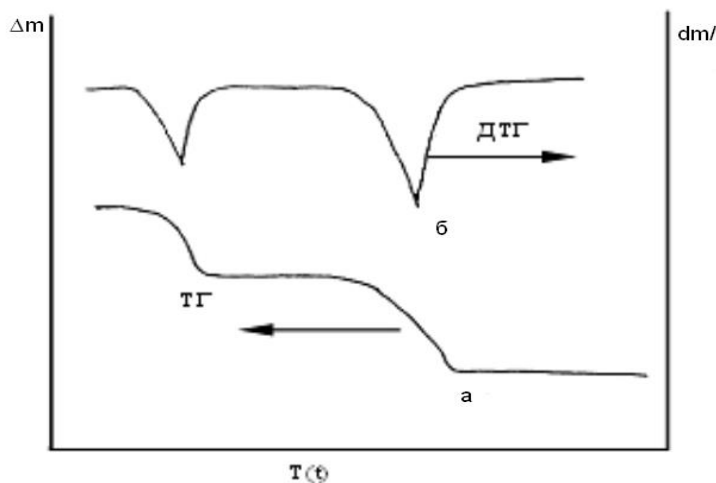


Рис. 9.1. Порівняння ТГ- кривої (а) і ДТГ- кривої (б) зміни маси

### Переваги ДТГ:

1. ДТГ-криві (рис. 9.1) можна одержати водночас з вимірами, проведеними методами ТГ і ДТА (диференціальний термічний аналіз).
2. При вимірах методом ДТГ точно визначаються початкова температура, максимальна швидкість і завершення реакції.
3. На ДТГ- кривих вдається розділити стадії, що

впливають безпосередньо одна за одну, вони відображаються пиками і можуть бути розділені.

4. ДТГ- криві являють собою похідні ТГ- кривих, тому площа під ними точно відповідає зміні маси. Отже, ДТГ може дати точну кількісну інформацію.

**Диференційно-термічний аналіз (ДТА).** Метод диференціального термічного аналізу (ДТА рис. 9.2) заснований на порівнянні властивостей зразка досліджуваної речовини і термічно інертної речовини, прийнятої за еталон ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Параметр який реєструється є різниця їхніх температур, яка вимірюється при нагріванні чи охолодженні зразка з постійною швидкістю, що може бути представлена у вигляді функції температури зразка чи еталона. Зміна температури зразка викликається фізичними переходами чи хімічними реакціями, зв'язаними зі змінами ентальпії. До них відносяться: фазові переходи, плавлення, перебудова кристалічної структури, кипіння, сублімація і випаровування, реакції дегідратації, дисоціації і розкладання, окислювання і відновлення, руйнування кристалічних ґрат та ін. Ці перетворення супроводжуються поглинанням чи виділенням тепла. У загальному випадку фазові переходи, дегідратація, відновлення і деякі реакції розкладання супроводжуються ендотермічними ефектами, а кристалізація, окислювання й окремі процеси розкладання - екзотермічними ефектами.

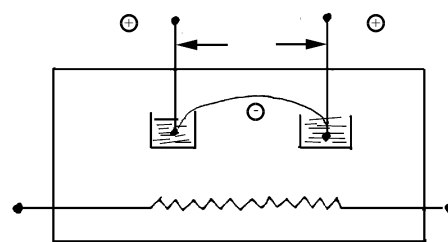
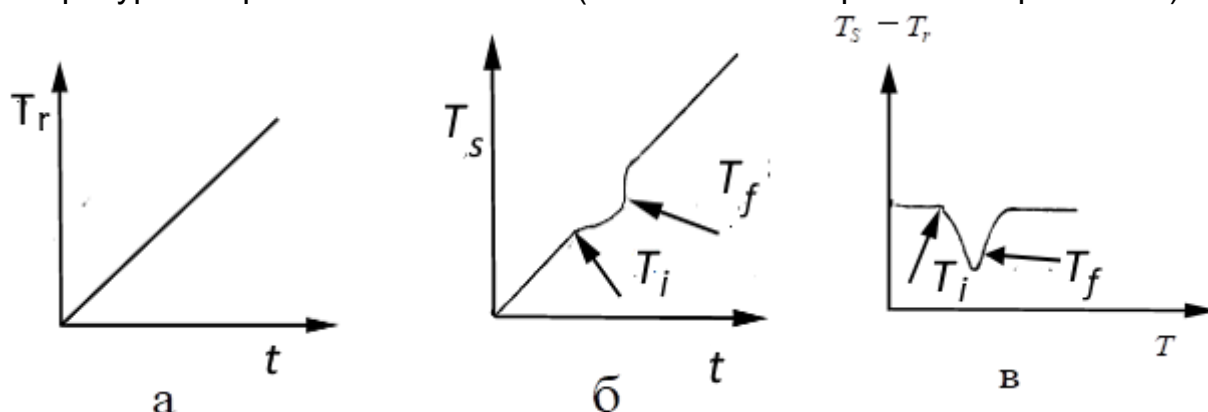


Рис. 9.2. Схема методу ДТА

На рис. 9.3 (а) температура еталону при нагріванні зростає по лінійному закону з часом. На рис. 9.3 (б) зображена температура зразка від часу. На цій залежності спостерігаються відхилення від лінійної залежності, що обумовлені екзо- і ендотермічними перетвореннями, які відбуваються в зразку. Температура  $T_i$ , при якій починається відхилення, називається температурою початку перетворення (реакції), що спостерігається. Перетворення закінчується при температурі  $T_f$ . При подальшому нагріванні температура зразка

стабілізується (продовження лінійної залежності від часу). Таку залежність отримують в методі термічного аналізу ТА.

Реєструючим параметром у диференціальному методі ДТА є різниця температур між зразком та еталоном (схематично зображено на рис. 9.3 в).



**Рис. 9.3. Ендотермічні перетворення. Порівняння методів термічного аналізу і диференціального термічного аналізу**

На рис. 9.3 (в) представлена різниця температур  $T_s - T_r$  як функція від температури системи  $T$  (температура еталона). При  $T_i$  крива відхиляється від горизонтального рівня з утворенням піків, спрямованих у залежності від знаку зміни ентальпії вгору чи вниз. Температура закінчення перетворення  $T_f$  в цьому випадку не відповідає ні температурі максимуму, ні температурі мінімуму піка, а розташована на його високотемпературній вітці піку.

Таким чином, за допомогою ДТА легко знайти невеликі зміни температури, а площа піка кривої пропорційна зміні ентальпії ( $\pm\Delta H$ ) і маси зразка.

### Опис дериватографа Q-1500 D

Зовнішній вигляд дериватографа системи Paulik-Paulik-Erdey Q - 1500 D наведений на рис. 9.4.



**Рис. 9.4. Зовнішній вигляд дериватографа Q – 1500 D**

Принципова схема дериватографу системи Paulik-Paulik-Erdey Q-1500 D зображена на рис. 9.5.

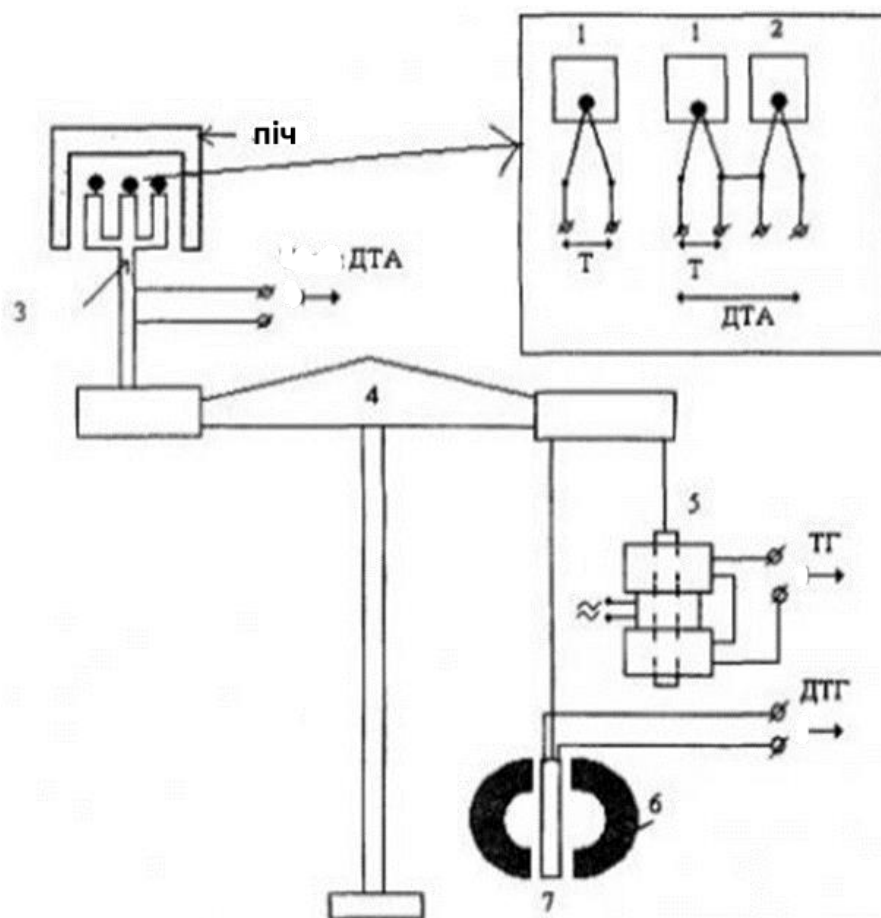


Рис. 9.5. Принципова схема дериватографа Q-1500 D:

- 1 – тигель з зразком,
- 2- тигель з еталоном,
- 3 – керамічна трубка,
- 4 – термотерези,
- 5 – диференціальний трансформатор,
- 6 – магніт,
- 7 – котушка.

Прилад оснащений аналітичними термовагами (4) на одному коромислі яких укріплений керамічний утримувач (3) для зразка і еталона. На тримачі розміщені три термопари. На дві термопари можна поміщати тиглі із зразками (1), а на третю термопару поміщають тигель з еталонною речовиною (2). Прилад може працювати в двох режимах: режим проведення простої термометрії і режим проведення диференціальної термометрії. У першому випадку в роботі використовується одна проста термопара на яку поміщений тигель зі зразком. У другому випадку використовується диференціальна термопара, що складається з двох простих термопар, підключених однойменними полюсами один до одного. На одній з них розміщується тигель зі зразком, на іншій - з еталонною речовиною. Вибір одного з режимів дослідження здійснюється за допомогою перемикача, розташованого на передній панелі приладу.

На іншому коромислі терезів розміщені два пристрої за допомогою яких вимірюють втрату маси і швидкість втрати маси зразка. Принцип роботи цих пристроїв заснований на явищі магнітної індукції.

Для вимірювання втрати маси використовують диференціальний трансформатор (5), який складається з трьох котушок, розміщених вертикально на одній осі. Трансформатор закріплений нерухомо на корпусі приладу. Всередину трансформатора розміщений металевий сердечник, підвішений на коромислі терезів. Цей сердечник зміщується, коли маса досліджуваного зразка

змінюється. Коли на середню котушку (первинна обмотка трансформатора) подається змінний струм, то в сусідніх котушках (вторинна обмотка трансформатора), з'єднаних один з одним зустрічно (диференційно), виникає індукційний струм. При симетричному розташуванні сердечника щодо котушок вторинної обмотки трансформатора сумарна напруга на них практично дорівнює нулю (вихідне положення терезів). При зміщенні сердечника сумарна напруга змінюється пропорційно величині зсуву. Таким чином, диференційний трансформатор перетворює рух плеча терезів в електричний сигнал, який фіксується реєструючим пристроєм. Для диференціального трансформатора характерними є висока чутливість і точність вимірювання.

Крива ДТГ знімається за допомогою пристрою, що складається з постійного магніту (6) і індукційної котушки (7). Індукційна котушка підвішується до терезів і розміщується в полі постійного магніту. Коли маса зразка змінюється, котушка починає переміщатися в однорідному магнітному полі. При цьому русі, в витках котушки виникає індукційний струм, величина якого пропорційна швидкості зміни маси.

Сигнали від термопар, диференціального трансформатора і індукційної котушки подаються через підсилювачі на АЦП та записуються на ПК. Таким чином, отримують одночасно криві простого (Т) і диференціального термічного (ДТА) аналізів, криву втрати маси (ТГ) і криву швидкості втрати маси (ДТГ)

### Порядок виконання роботи.

1. Зняти криві Т, ТГ, ДТГ та ДТА для досліджуваного зразка.
2. Для аморфно кристалічних зразків визначити температури переходів.
3. Визначити площі (  $S$  ) під піками на кривій ДТА та за формулою підрахувати

$H_{зр}$ :

$$H_{зр} = SH_{em}m_{зр}$$

де  $H_{зр}$  – теплота фазового переходу зразка;

$H_{em}$  – теплота фазового переходу еталону;

$m_{зр}$  – маса зразка.

### Контрольні питання.

1. Які перетворення можуть спостерігатись у аморфно-кристалічному зразку при нагріванні?
2. Які перетворення називаються фазовими переходами?
3. Що таке температура фазового переходу і як її визначають?
4. Як проявляються процеси плавлення і перекристалізації на залежностях ДТА.
5. Що таке прихована теплота фазового переходу, як її визначають методом ДТА?
6. Принцип роботи дериватографа та метода ДТА.
7. З чим може бути пов'язана втрата маси рідинної системи при нагріванні?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №10

### **ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОЄМНОСТІ МЕДИКО-БІОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ У ШИРОКОМУ ІНТЕРВАЛІ ТЕМПЕРАТУР**

#### **Мета роботи:**

1. Ознайомитись з будовою та принципом дії динамічного калориметра.
2. Дослідити температурну залежність питомої теплоємності при постійному тиску для кристалічної речовини в області фазового переходу I роду.
3. Визначити температуру плавлення та питому теплоту плавлення кристалічного та частково-кристалічного тіла.
4. Дослідити залежність питомої теплоємності від температури для аморфного тіла поблизу температури склування.
5. Визначити температуру склування та температурний інтервал склування аморфного і частково-кристалічного тіла.

**Прилади та обладнання:** Динамічний калориметр, зразки для дослідження, аналітичні терези.

#### **ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ**

##### ***Природа зміни теплоємності частково-кристалічних тіл***

Згідно з теоремою статистичної фізики про рівномірний розподіл енергії по ступеням вільності, справедливої для всіх речовин в області використання класичних законів фізики **питома теплоємність тіл** (кількість теплоти необхідної для того, щоб нагріти 1 кг речовини на 1 K) залежить від числа ступенів вільності. Так, для склоподібного або кристалічного стану речовини характерні лише коливальні ступені вільності. У вискоеластичному стані (після процесу склування) і в'язкотекучому стані (після процесу плавлення) проявляються обертальні і поступальні ступені вільності, що приводить до зростання теплоємності. Тому для аморфних і частково-кристалічних тіл при переході температури склування (у процесі нагрівання) теплоємність тіл стрибкоподібно змінюється.

В області фазових переходів (плавлення, кристалізація) також спостерігається різка зміна теплоємності. Ці процеси в широкому інтервалі температур вивчаються методами калориметрії, чутливість яких в результаті використання електронних схем є досить високою.

Інформацію про зв'язок молекулярної будови тіл з їхніми фізичними властивостями отримують, вивчаючи їхні фізичні перетворення (або переходи). До таких перетворень і відносяться процеси склування і плавлення. Аналіз експериментальних даних показує, що разом ці процеси спостерігаються лише у частково-кристалічних тілах.



Процеси плавлення (кристалізації) відносять до фазових переходів I роду, при яких перші похідні термодинамічного і хімічного потенціалу по тиску і температурі зазнають "стрибка".

Склування відносять до кінетичних релаксаційних процесів. Вони залежать від швидкості нагрівання, у той час як фазові переходи I роду не залежать від швидкості нагрівання.

Для тіл складної молекулярної будови плавлення відбувається не при одній визначеній температурі, а в певному інтервалі температур, який може досягати десятків градусів. Це характерно і для процесу склування і пояснюється неоднорідністю кристалічної і аморфної структури. Буває, що кристалічна структура представлена двома та більше типами кристалів. Тоді на кривій теплоємності спостерігається два і більше "піків" плавлення з найбільш імовірними значеннями температури плавлення  $T_{\delta i}$ . Аналогічно до цього може спостерігатись декілька температур склування  $T_{\alpha i}$ , як показано на рис. 10.1.

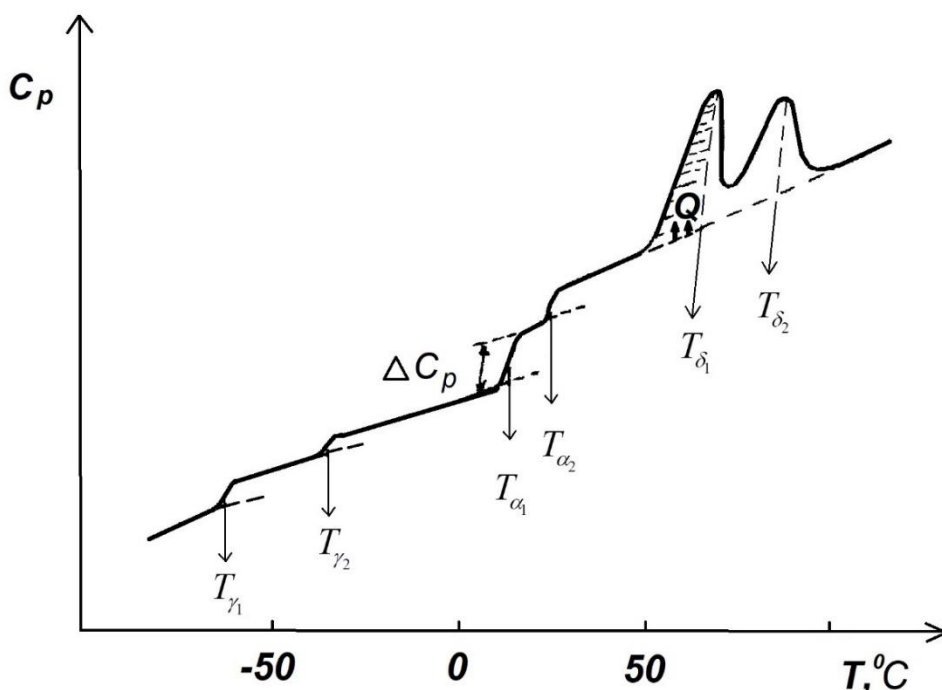


Рис. 10.1. Температурна залежність теплоємності аморфно-кристалічного тіла з проявом фізичних переходів і зазначенням температур переходів:

$\gamma_i$  - дрібномаштабні релаксаційні процеси, що викликаються коливальним рухом атомів кінцевих і бокових груп молекул;

$\alpha_i$ - процес склування, викликаний коливально-обертальним рухом груп атомів (сегментів);

$\delta_i$  - фазові переходи першого роду, викликані процесами плавлення, які йдуть з поглинанням тепла.

Оскільки процес плавлення іде з поглинанням тепла, то калориметр дозволяє визначити кількість теплоти, що поглинається. Це, в свою чергу, дозволяє визначити процентний вміст кристалічної фази в аморфно-кристалічному тілі.

## Опис експериментальної установки

Найбільш точні визначення теплоємності можна отримати за допомогою **адіабатних калориметрів**, в яких нагрівання зразків проводиться або стрибкоподібно, або з дуже малою швидкістю. Але для дослідження релаксаційних переходів вони мало придатні, оскільки у досліджуваних зразках за час нагрівання можуть відбуватись необоротні процеси. У зв'язку з цим для дослідження фізичних переходів використовуються адіабатні калориметри з динамічним режимом нагрівання зразка. Тобто зразок маси порядку  $10^{-3}$  кг нагрівається з швидкостями від 1 до 10 К/хв. Зменшення швидкості нагрівання до малих значень приводить до зменшення чутливості установок, але при цьому збільшується роздільна здатність.

Високу роздільну здатність мають **диференціально-скануючі калориметри** (ДСК), але в них мала чутливість, що не дозволяє відрізнити релаксаційні переходи типу склування. Тому калориметр, що пропонується, маючи високу чутливість і достатню роздільну здатність, для даних досліджень є оптимальним.

Принцип дії динамічного диференціального калориметра ґрунтується на використанні рівняння Фур'є для теплопровідності:

$$Q = \lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} \cdot S \cdot t \quad (10.1)$$

де  $\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності стінки;

$\frac{\Delta T}{\Delta x}$  - градієнт температури на товщині стінок;

$S$  - площа бічної поверхні, перпендикулярної напрямку теплового потоку;

$t$  - час, протягом якого здійснювався теплообмін через стінки посудини;

$Q$  - кількість теплоти, що передана в результаті теплообміну в даних умовах.

Якщо при цьому забезпечити замкненість оболонки (наприклад, у вигляді нескінченної циліндричної поверхні, як це показано на рис. 10.2), то  $Q$  буде мати зміст кількості теплоти, що ввійшла в середину оболонки, тобто кількості теплоти, що пішла на нагрівання тіла, замкненого даною оболонкою. Тоді

$$Q = c_p m \Delta T \quad (10.2)$$

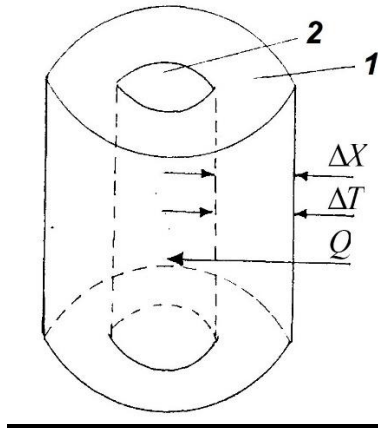
де  $c_p$  - питома теплоємність;  $\Delta T$  - зміна температури;  $m$  - маса зразка, що знаходиться всередині оболонки.

Прирівнявши рівняння (10.1) і (10.2) і поділивши одержане на  $m \Delta T$ , матимемо:

$$c_p = \frac{\lambda \Delta T S t}{\Delta x m \Delta T} \quad (10.3)$$

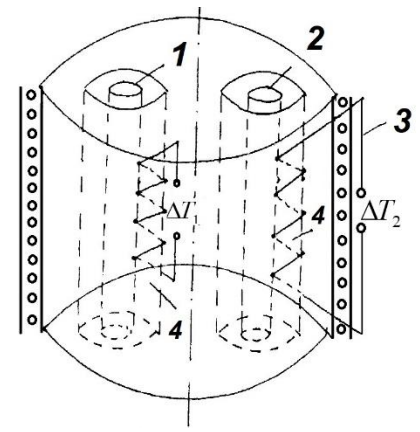
Врахувавши, що в рівнянні (10.3) величина  $\frac{\Delta T}{t} = q$  - швидкість нагрівання зразка, маємо:

$$c_p = \frac{\lambda \Delta T S}{\Delta x m q} \quad (10.4)$$



**Рис. 10.2. Схема вимірювальної комірки калориметра:**  
1 – стінка малої теплопровідності;  
2 – отвір для досліджуваного зразка

**Рис. 10.3. Схема вимірювального блока:**  
1,2 – вимірювальна комірка;  
3 – нагрівач;  
4 - термобатареї



Розмістимо симетрично дві однакові комірки в спільному теплопровідному корпусі великої теплоємності, як це показано на рис. 10.3. Комірки виготовлені з однакового матеріалу ( $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$ ) та геометрично ідентичні ( $S_1 = S_2 = S; h_1 = h_2 = h; \Delta x_1 = \Delta x_2 = \Delta x$ ), мають спільний нагрівач 3. Нехай, в комірці 1 знаходиться зразок, питому теплоємність  $c_p$  якого треба визначити. В комірці 2 - еталонний матеріал, залежність питомої теплоємності від температури якого відома ( $c_p$ ). Тоді:

$$c_{p_1} - c_{p_2} = \frac{\lambda \Delta T_1 S}{\Delta x \cdot m_1 \cdot q} - \frac{\lambda \Delta T_2 S}{\Delta x \cdot m_2 \cdot q} = \frac{\lambda S}{\Delta x q} \left( \frac{\Delta T_1}{m_1} - \frac{\Delta T_2}{m_2} \right) \quad (10.5)$$

Як видно з рівняння (10.5), різниця теплоємностей досліджуваного зразка та еталона визначатиметься різницею перепадів температури на оболонках 1 і 2 та набором сталих для даного приладу величин ( $\lambda, S, \Delta x, q$ ). Таким чином, відбувається перехід від абсолютного (рис.10.2) до відносного або диференціального (рис. 10.3) методів вимірювання питомої теплоємності.

Зрозуміло, що для визначення питомої теплоємності досліджуваного матеріалу необхідно знати значення питомої теплоємності еталонного зразка для кожної температури та значення констант приладу.

Величини перепадів  $\Delta T_1$  та  $\Delta T_2$  визначають, розміщуючи на внутрішній і зовнішній бічних поверхнях комірок спаї послідовно з'єднаних диференціальних термобатарей 4 (рис.10.3). Тоді визначення  $\Delta T_1$  та  $\Delta T_2$  зводиться до визначення відповідних термоелектрорушійних сил, а визначення різниці  $\Delta T_1 - \Delta T_2$  забезпечується послідовним з'єднанням термобатарей з урахуванням їх полярності. Маса зразка та еталона визначають шляхом попереднього зважування на аналітичних терезах.

З урахуванням вищезазначеного запишемо:

$$c_{p1} = \frac{k\Delta T / q - H}{m_1} \quad (10.6)$$

де:  $k$  і  $H$  - константи приладу, що залежать від  $m$ ;  
 $\lambda$ ;  $S$ ;  $\Delta x$ ;  $\Delta T$  - різниця перепадів температур  $\Delta T_1 - \Delta T_2$ ;  
 $m$  - маса зразка.

Константа  $K$ , крім того, залежить від кількості спаїв диференціальної термобатареї 4, тобто від чутливості калориметра. Введення константи  $H$  зумовлене тим, що практично виготовити абсолютно ідентичні комірки неможливо. Отже,  $H$  характеризує різницю між параметрами комірок ( $\lambda_1, \lambda_2; S_1, S_2; q_1, q_2$ ).

У рівнянні (10.6) величини  $k$  і  $H$  визначають дослідним шляхом (калібруванням приладу). Для знаходження двох невідомих рівняння (10.6) використовують двічі. Проводять два досліди. Перший дослід: з першої комірки виймають зразок. Комірка заповнена повітрям, для якого  $m_{пов} \rightarrow 0$ . Отже,  $c_{pпов} \cdot m_{пов} = 0$ . Тоді:

$$\frac{k\Delta t_{пов}}{q_{пов}} - H = 0 \quad (10.7)$$

Другий дослід: у першу комірку вміщують еталон, такий же, як і в другу комірку. У цьому випадку:

$$c_{pET} \cdot m_{ET} = \frac{k\Delta T_{ET}}{q_{ET}} - H \quad (10.8)$$

Спільний розв'язок рівнянь (10.7) та (10.8) дає можливість знайти величини  $K$  та  $H$ :

$$K = \frac{Hq_{пов}}{\Delta T_{пов}} \\ H = \frac{c_{pET} \cdot m_{ET} \cdot \Delta T_{пов}}{q_{пов} \cdot \Delta T_{ET} - q_{ET} \Delta T_{пов}} \quad (10.9)$$

Температуру плавлення та питому теплоту плавлення визначають за кривою експериментальної залежності  $c_p = f(T)$  в температурному інтервалі

фазового переходу 1 роду. Температура плавлення визначається за максимумом кривої  $c_p = f(T)$ . Площа фігури, що лежить під піком плавлення, відповідає загальній кількості теплоти, що витрачається на здійснення цього переходу, і, отже, дозволяє визначити питому теплоту плавлення

$$Q_{пл} = B \cdot S, \quad (10.10)$$

де  $B$  - константа приладу;

$S$  - площа фігури, що лежить під піком плавлення.

Константу приладу  $B$  визначають, спостерігаючи плавлення відомої речовини, для якої відома питома теплота плавлення ( $\gamma$ ). Тоді для еталона:

$$\begin{aligned} Q_{ET} &= B \cdot S_{ET}; \\ Q_{ET} &= m_{ET} \cdot \gamma_{ET}. \end{aligned}$$

Звідки:

$$B = \frac{m_{ET} \cdot \gamma_{ET}}{S_{ET}}. \quad (10.11)$$

де  $\gamma_{ET}$  - прихована теплота плавлення.

Блок-схема динамічного калориметра представлена на рис. 10.4.

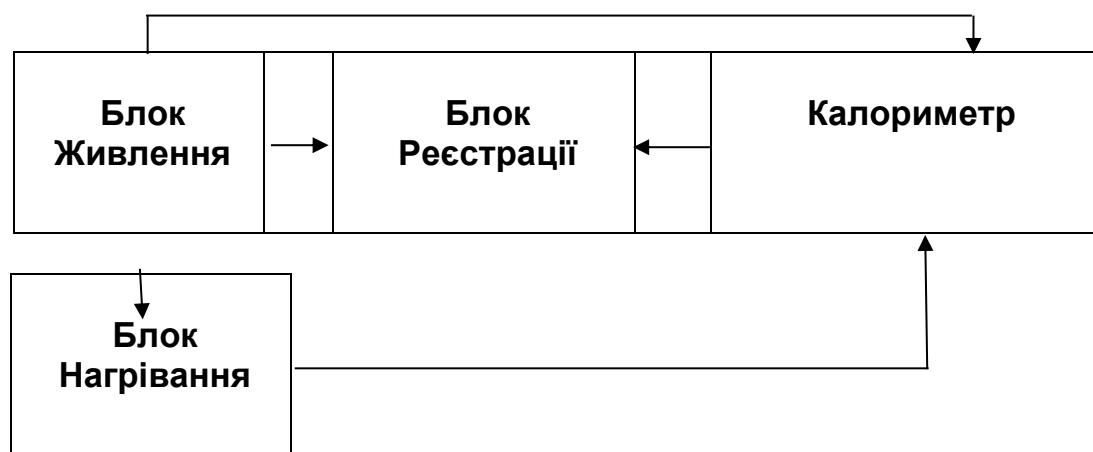


Рис. 10.4. Блок-схема установки для вимірювання температурної залежності теплоємності

**Калориметр** складається: з теплопровідного корпусу великої ємності, з симетрично розміщеними всередині нього вимірювальними комірками; блоків живлення, нагрівання та реєстрації. Корпус калориметра вміщений у термокріокамеру.

Блок живлення забезпечує створення наростаючої в часі напруги, яка подається на нагрівник вимірювальної комірки. При цьому забезпечується режим, близький до лінійного нагрівання, коли  $T \sim t$ , тобто температура прямо пропорційна часу. При такому режимі нагрівання на термобатареях виникає термоЕРС, пропорційна величинам  $\Delta T_1$  та  $\Delta T_2$ , а, отже, і теплоємностям еталона та зразка. Крім того, під зразком в комірці 1 розміщено термопару, яка вимірює температуру зразка. Другий спай цієї термопари розміщений в посудину Д'юара з танучим льодом. Різниця сигналів термобатарей комірок, сигнал термопари та

фіксована частина сигналу термобатарей, в якій міститься еталон, подаються на АЦП. Данні записуються у вигляді таблиці та будується одночасно графік на моніторі комп'ютера (рис. 10.5.)

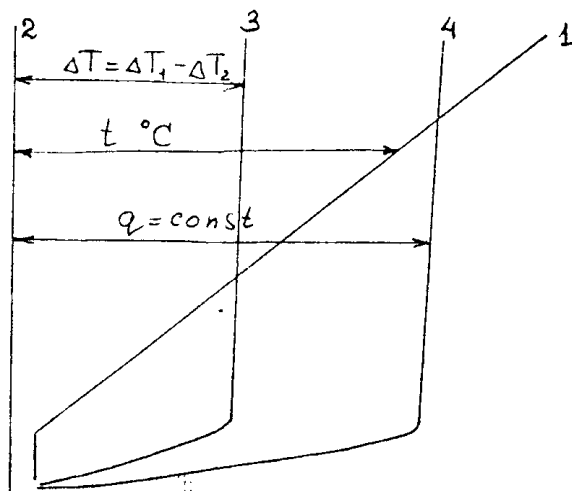


Рис. 10.5. Вигляд на моніторі комп'ютера, де:  
лінія 1 - лінія запису зростання температури зразка,  
лінія 2 – край монітора,  
лінія 3 – лінія для визначення теплоємності,  
лінія 4 – лінія контролю швидкості нагрівання.

Для визначення питомої теплоти плавлення визначають площу фігури, що лежить під піком плавлення (рис. 10.6).

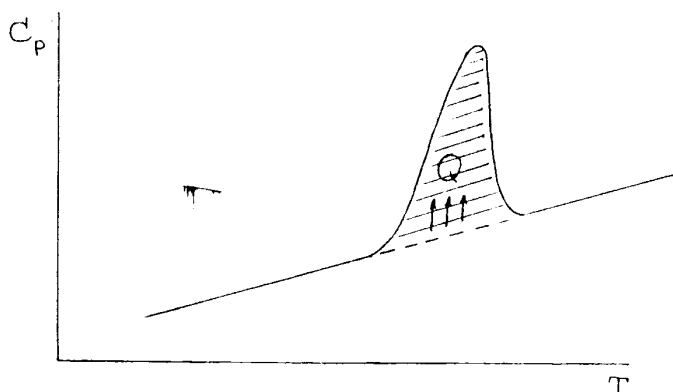


Рис. 10.6. Площа піка плавлення кристалічної речовини (заштрихована область) на кривій теплоємності

### РОЗРАХУНОК ПОХИБКИ ВИМІРЮВАНЬ.

Для розрахунку питомої теплоємності використовується формула:

$$C_p = \frac{k\Delta T/q - H}{m} \quad (10.12)$$

При цьому  $C_p = f(\Delta T, q, m)$ , а  $k$  і  $H$  - є сталі установки.

Для визначення похибки вимірів питомої теплоємності використаємо відомі співвідношення:

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f_i}{\partial x_i} \right)^2 x_i^2} \quad (10.13)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta y}{y} = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial \ln f_i}{\partial x_i} \right)^2 \Delta x_i^2} \quad (10.14)$$

де  $\Delta x_i$  - абсолютна похибка вимірів, яка визначається класом точності вимірювальних приладів, а величини  $\Delta y$  та  $\varepsilon$  є похибкою функції  $y$  від змінних  $x_1, x_2, \dots, x_n$  і відносна похибка величини  $y$ .

На основі рівнянь (10.13), (10.14) похибка для питомої теплоємності прийме вигляд:

$$\Delta C_p = \sqrt{\left( \frac{\partial C_p}{\partial \Delta t} \right)_{q,m}^2 \Delta \Delta t^2 + \left( \frac{\partial C_p}{\partial q} \right)_{\Delta t,m}^2 \Delta q^2 + \left( \frac{\partial C_p}{\partial m} \right)_{\Delta t,q}^2 \Delta m^2}. \quad (10.15)$$

Візьмемо частинні похідні по-параметрам  $\Delta t$ ,  $q$ ,  $m$ , які визначаються з точністю  $\pm 1 \cdot 10^{-3}$  В,  $\pm 1 \cdot 10^{-2}$  К/с і  $\pm 5 \cdot 10^{-5}$  кг відповідно.

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial C_p}{\partial \Delta t} \right)_{q,m} &= \frac{K}{mq}, \\ \left( \frac{\partial C_p}{\partial q} \right)_{\Delta t,m} &= -\frac{K \Delta t}{mq^2}, \\ \left( \frac{\partial C_p}{\partial m} \right)_{q,\Delta t} &= \left( \frac{K \Delta t}{q} - H \right). \end{aligned}$$

Підставляємо середні значення параметрів ( $K = 8$  Дж/К с,  $H = 0.8$  Дж/К,  $\Delta t = 0.8$  В,  $q = 3.33 \cdot 10^{-2}$  К/с,  $m = 10^{-3}$  кг) в (10.15), з урахуванням частинних похідних, отримуємо:  $\Delta C_p = 32$  Дж/кг К.

Відносна похибка методу визначається з виразу:

$$\varepsilon = \pm \sqrt{\left( \frac{\partial \ln C_p}{\partial \Delta t} \right)_{q,m}^2 \Delta \Delta t^2 + \left( \frac{\partial \ln C_p}{\partial q} \right)_{\Delta t,m}^2 \Delta q^2 + \left( \frac{\partial \ln C_p}{\partial m} \right)_{\Delta t,q}^2 \Delta m^2}. \quad (10.16)$$

Враховуючи числові значення, маємо, що  $\varepsilon = 2.5\%$ .

Таким чином, **відносна похибка експериментальної установки** не перевищує  $\pm 2.5\%$ , а максимальний довірчий інтервал вимірювальної величини питомої теплоємності ( $\pm 32$  Дж/кг К) з урахуванням похибок, від вимірювальної апаратури відповідно їх класу точності.

Оцінімо тепер випадкову похибку отриманих експериментальних результатів за допомогою розподілу Стюдента для малих вибірок. Візьмемо 6-ть вимірів питомої теплоємності при кімнатній температурі (дані представлені у таблиці 10.1.).

Таблиця 10.1.

№ досліду	1	2	3	4	5	6
$C_p$ при 20 °С Дж/кг К	765	746	714	742	730	725

Математичне сподівання  $MC_p$  випадкової величини  $C_p$  дорівнює 1737 Дж/кг К. Середнє квадратичне відхилення  $S_n = 17,32$  Дж/кг К.

Визначимо ймовірність того, що значення вимірювальної величини попадає до інтервалу  $|x_i| = 35.9$  Дж/кг К. Відповідно до розподілу Стюдента для експериментальних даних, маємо  $t_\alpha = 4.9$ . При цьому, довірчий інтервал складає 2.1% при довірчій імовірності  $\alpha = 0.95$ .

Таким чином, **випадкова похибка результатів вимірів** (2.1%) менше максимально-імовірної похибки установки (2.5%). Тому, похибку метода, визначається похибкою використовуваних нами приладів і дорівнює  $\pm 2.5\%$ .

Невірна обробка експериментальних даних може привести до втрати інформації, оскільки деякі закономірності можуть бути не вказані. Це пов'язано з тим, що у більшості випадків при обробці результатів і оцінюється лише точність вимірюваної величини, і не оцінюється **вірогідність спостереження** того чи іншого явища. Ще гіршим є такий стан, коли дослідник вносить у кінцевий результат деякі ефекти, які насправді не впливають із вимірювань, а з'являються в результаті статистичних флуктуацій похибок вимірювань.

Особливо важливою є оцінка достовірності експериментальних результатів тоді, коли зміна фізичної величини незначно перевищує межі похибки даного методу, або знаходиться на його рівні. **Необхідність оцінки достовірності** таких результатів зумовлена тим; що коли результат знаходиться в меж їх розумних сумнівів, то його не слід відкидати автоматично як такий, що дійсно неможливий.

## ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Ознайомитись з будовою та принципом дії калориметра відповідно до інструкції.

2. Для дослідження залежності питомої теплоємності від температури кристалічного тіла необхідно виконати такі операції.

1. Вмістити холодний спай термопари калориметра в посудину Д'юара. Перевірити за допомогою термометра наявність у ній температури, що відповідає 273 К.
2. Зважити зразок, підготований для вимірювання та помістити його у вимірювальну комірку калориметра.
3. Записати масу зразка та інші його характеристики в протоколі роботи.
4. Вмістити калориметр у термोकріокамеру та з'єднати його з вимірювальним контуром.
5. За показами вольтметра встановити на блоці живлення напругу 50 В.



6. Запустити програму, яка контролює процес вимірювання та рівномірного нагріву.
7. Прослідкувати за процесом плавлення досліджуваного тіла (на моніторі).
8. Після закінчення процесу плавлення вийти з програми.
9. Витягти вимірювальну комірку з термокріокамери та провести її охолодження до кімнатної температури.
10. Перенести файл з даними до Origin або інший пакет.
11. Користуючись рівнянням  $c_{p1} = \frac{k\Delta T}{q} - H$  та значенням  $K$  і  $H$  для різних температур, визначити залежність питомої теплоємності від температури в заданому інтервалі температур.
12. Побудувати графік залежності  $c_p = f(T)$  в області фазового переходу.

### 3. Визначити **температуру плавлення та питому теплоту плавлення**.

Для цього:

- користуючись графіком  $c_p = f(T)$ , визначити температуру плавлення та площу фігури, що лежить під піком плавлення;
- користуючись одержаним значенням маси та співвідношенням  $\gamma = \frac{B_m}{m_{\text{зразка}}}$ , визначити питому теплоту плавлення.

4. Для дослідження залежності питомої теплоємності від температури для аморфного тіла необхідно після охолодження калориметра до кімнатної температури повторити всі операції, що відповідають **2.** з тією лише різницею, що у вимірювальну комірку замість кристалічного – вміщують зразок аморфного тіла.

### 5. Загальний вигляд результату на моніторі показаний на рис. 10.7.

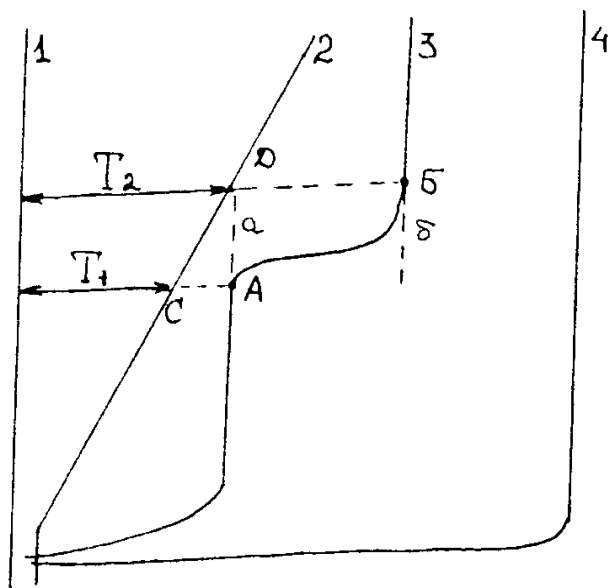


Рис. 10. 7. Загальний вигляд результату запису процесу склування, де:

- 1 – початок монітору,
- 2 – лінія температури,
- 3 – лінія теплоємності,
- 4 – лінія швидкості нагрівання.

Для визначення **температури склування** до лінії теплоємності 3 проводять дотичні а і б точки відриву дотичних А і В, проведених до кривої теплоємності, приймають за початок і кінець процесу силування. Точкам А і В на лінії температури 2 відповідають точки С і Д. Числові значення початку і кінця температури силування, що відповідають точкам С і Д, знаходять за методикою, описаною у завданні 3. Величина  $\Delta T = T_2 - T_1$  носить назву температурного інтервалу склування. Середина цього інтервалу, або температура  $T_\alpha$ ,

$$T_\alpha = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

називається **температурою склування**.

6. Згідно з критерієм Еренфеста фазовим переходом I роду називається фазовий перехід, для якого перша похідна від термодинамічного потенціалу має розрив при температурі переходу. Чи справджується цей критерій у випадку ваших вимірювань? Запропонуйте спосіб його перевірки самостійно та зробіть висновки.

### Контрольні питання

1. Які перетворення можуть спостерігатись у частково-кристалічному зразку при нагріванні?
2. Запишіть закон Фурє та дайте визначення теплопровідності.
3. Дайте визначення питомої теплоємності?
4. Як визначити температуру плавлення, теплоту плавлення та температуру склування біополімеру?
5. Чи залежать температури переходів від швидкості нагрівання зразка?
6. Про що говорить критерій Еренфеста?
7. Принцип роботи динамічного диференціального калориметр?

## РЕКОМЕНДОВАНІ ДЖЕРЕЛА

### Основна:

1. Адаменко І.І., Булавін Л.А. Фізика рідин та рідинних систем. Київ: АСМІ, 2006. 650 с
2. Landau L.D., Lifshitz E.M. Theory of elasticity. – Elsevier, 2012. – 356 p.
3. Landau L.D., Lifshitz E.M. Fluid mechanics. – Elsevier, 2012. – 456 p.
4. Булавін Л.А., Забашта Ю.Ф. Фізична механіка полімерів. Ч. 1. Деформації полімерних континуумів: навч. посібник. - К.: ВЦ «Київський університет», 1999. – 226 с.
5. Булавін Л.А., Забашта Ю.Ф., Свечнікова О.С. Фізика полімерів: навч. посібник. - К.: ВПЦ «Київський університет», 2004. – 129 с.
6. Лазаренко М.М., Забашта Ю.Ф., Сенчуров С.П., Свечнікова О.С. Термодинамічні та релаксаційні характеристики рідинних та полімерних систем. Київ: КНУ імені Тараса Шевченка, 2017. С.40
7. Mai-Duy Nam, Phan-Thien Nhan. Understanding viscoelasticity: an introduction to rheology. – Springer, 2017. – 312 p.
8. Основи реології: Лабораторний практикум / Булавін Л.А., Адаменко І.І., Забашта Ю.Ф. та інш. – К.: ВПЦ «Київський університет», 2001. – 56 с.
9. Железний В.П., Геллер В.З., Семенюк Ю.В. Експериментальна теплофізика. Методи дослідження теплофізичних властивостей речовин. Одеса : Фенікс, 2016. - 319

### Додаткова:

1. Birkhoff, Garrett. Hydrodynamics. -Princeton University Press, 2015, 202 p.
2. Morrison, Faith A., et al. Understanding rheology. -New York: Oxford university press, 2001, 416 p.
3. Partal, Pedro; Franco, José M<sup>a</sup>. Non-Newtonian fluids. Rheology: encyclopedia of life support systems (EOLSS). - UNESCO. Eolss, Oxford, 2010, p. 96-119.
4. Irgens, Fridtjov. Rheology and non-Newtonian fluids. - New York: Springer International Publishing, 2014.
5. Finn, Colin BP. Thermal physics. - CRC Press, 2017.
6. Brown, Michael E.; Gallagher, Patrick K. Handbook of thermal analysis and calorimetry: recent advances, techniques and applications. 2011. 780 p.
7. Gaisford, Simon; Kett, Vicky; Haines, Peter (ed.). Principles of thermal analysis and calorimetry. - Royal society of chemistry, 2019. 280 с.
8. Osswald T.A. Polymer rheology: fundamentals and applications. – Hanser Publications, 2015. – 230 p.
9. Mezger Th. G. The rheology handbook. – Vincentz Network, 2014. – 434 p
10. Grimvall, G. Thermophysical properties of materials. – Elsevier, 2021. - 424 p
11. Інструкція з експлуатації ротаційного віскозиметра ViscoQC 100