

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ  
НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНИЙ КАБІНЕТ ВИЩОЇ ОСВІТИ  
КИЇВСЬКИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

**В. Р. Кулінченко, І. К. Мотуз, І. Г. Зеленюк**

**ОСНОВИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ  
З ГІДРАВЛІКИ ТА ГІДРАВЛІЧНИХ МАШИН**

Київ НМК ВО 1993

Куліниченко В.Р., Мотуз І.К., Зеленюк І.Г. Основи наукових досліджень з гідравліки та гідравлічних машин: Навч. посібник.- К: НМК ВО, 1993.- 248 с.

У даному навчальному посібнику розглянуто застосування основних законів гідравліки не тільки під час транспортування рідких напівпродуктів в технологічних циклах, але й їх переробку в окремих апаратах - ректифікаційних колонах, плівкових тепломасообмінних апаратах, випарниках, вакуумних фільтрах.

Матеріал викладено в строгій логічній послідовності від простого до складного з застосуванням відповідного математичного апарату.

Рекомендується як навчальний посібник для студентів енерго-механічних та технологічних спеціальностей.

Рис. 93. Табл. 57. Бібліогр: 17 назв.

Рецензенти: С.Ф.Білик, д-р техн. наук  
В.О.Штангеев, доц.

ISBN 5-7763-1511-5

© Навчально-методичний  
кабінет вищої освіти,  
1993

Діп

Гідравлічні задачі стосуються, головним чином, потоків рідини, обмежених твердими стінками, тобто потоків у трубах, каналах, елементах різних машин і пристроїв.

Математичне розв'язання гідравлічних задач зводиться до складання та інтегрування диференціальних рівнянь руху рідини. Цей метод застосовується тільки для простих потоків. У більшості випадків характер руху рідин настільки складний, що встановити рівняння, які описують його рух, неможливо. У таких випадках в реальний рух вносять спрощення і рівняння руху складають та інтегрують для вибраної спрощеної моделі. Похибки, які вносяться спрощеннями, можуть бути оцінені тільки дослідним шляхом. Грунтуючись на дослідних даних, у розв'язок вносять поправки, які дають змогу використувувати його в інженерній практиці. Таким чином, дослід є невід'ємною частиною більшості гідравлічних задач, в яких використовуються результати експериментів.

Дослід набуває особливо важливого значення під час розв'язання задач, пов'язаних з такими рухами рідини, які не піддаються теоретичній схематизації, наприклад з потоками в деяких місцевих опорах і каналах гідравлічних машин. Внаслідок складності процесів руху рідини в каналах таких машин їх точний аналітичний розрахунок сучасними методами неможливий. Проектування гідравлічних машин базується певною мірою на результатах дослідів.

Таким чином, найбільш продуктивним методом гідравлічних досліджень є комбінований метод, який поєднує теорію з дослідом. Наукова основа гідравлічного експерименту - теорія моделювання, яка ґрунтується на теорії подібності.

Слід відмітити, що в деяких випадках механічний рух рідин супроводжується складними фізичними явищами /наприклад, при кавітації, гідравлічному ударі тощо/, які можуть призвести до негативних

рішень, якщо їх не враховувати під час розв'язання задач гідравліки.

Дані лабораторні роботи дають можливість набути певного досвіду під час виконання простих експериментальних досліджень з трьох розділів: гідростатики, гідродинаміки та гідравлічних машин.

### ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Навчальні плани фахової підготовки інженерно-технічних кадрів переробних галузей сільськогосподарської сировини включають у себе вивчення загальнотехнічної дисципліни "Гідравліка та гідравлічні машини". Значення цієї дисципліни в інженерній діяльності збільшується у зв'язку з насиченістю промислових підприємств машинами та апаратами, які працюють використовуючи основні закони гідравліки та гідравлічних машин.

Обслуговування промислових машин та апаратів в оптимальному з економічної точки зору реалізувати роботи вимагає від інженерів знань законів перетворення енергії рідин у статичному стані і під час руху. Тому курс "Гідравліки та гідравлічних машин" складається з трьох розділів: гідростатики, гідродинаміки та гідравлічних машин.

Кваліфікаційні характеристики підготовки спеціалістів харчової промисловості вимагають від інженера оволодіння навичками гідравлічних вимірів, а також експлуатації та проектування гідромеханічного обладнання. На цій підставі навчальні плани передбачають виконання лабораторного практикуму з курсу "Гідравліка та гідравлічні машини". Заключна мета лабораторного практикуму – поглиблене вивчення важливих тем трьох основних розділів курсу і набуття практичного досвіду гідравлічних вимірів.

Лабораторні роботи студенти виконують, як правило, після вивчення теоретичного матеріалу відповідної теми і опрацювання інструкції до роботи. Після цього готується протокол, в якому необхідно:

визначити мету роботи;

накреслити схему лабораторної установки із специфікацією основних елементів;

коротко викласти порядок проведення роботи і методики опрацювання дослідних даних;

підготувати таблицю для запису результатів вимірів розрахунків.

Перед виконанням лабораторної роботи викладач в усній чи в письмовій формі проводить індивідуальний опит студентів. Непідготовлені студенти, а також ті, які не пройшли інструктаж з техніки безпеки, або ті, що його порушують, до виконання роботи не допускаються.

Опрацьовувати результати вимірів необхідно згідно Міжнародної системи одиниць - ГОСТ-8.417-81 з використанням індивідуальних засобів обчислювальної техніки /мікрокалькуляторів/. При цьому особливу увагу необхідно звернути на осмислення фізичного змісту отриманих результатів і оцінки похибок вимірів.

Оформлений звіт лабораторної роботи здається викладачу. При самопідготовці до здачі звіту студенту необхідно самостійно відповісти на контрольні запитання, які подаються в кінці кожної роботи.

Залік з лабораторного практикуму виставляється після виконання і здачі всіх робіт, які передбачені навчальною програмою курсу.

### АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

Одна із головних задач виконання лабораторних робіт - визначення числових значень фізичних величин шляхом вимірювань. Вимірювання - це порівняння певної фізичної величини з аналогічною їй величиною, яка приймається за одиницю виміру /наприклад: лінійний розмір тіла порівнюється з одиницею довжини - 1 м/.

Розрізняють прямі і непрямі вимірювання. Виконуючи прямі виміри, значення фізичної величини визначають безпосередньо під час вимірювання /час, маса, сила току, довжина тощо/. В той самий час велика кількість фізичних величин /середня швидкість рідини, витрати, в'язкість та ін./ не можуть визначатися безпосередніми вимірами. Їх розраховують за певними рівняннями, в які входять й інші фізичні величини, що визначаються за допомогою прямих вимірів. Наприклад, середня теоретична швидкість витікання рідини із отвору розраховується за рівнянням  $v = \sqrt{2gh}$ , в якому втрати напору  $h$  визначаються прямим виміром, а середня швидкість  $v$  розраховується. Таке визначення фізичної величини відноситься до непрямих вимірів.

У сучасній науці й техніці доволіно прийняті певні фізичні величини, які називаються основними: довжина - метр /м/, маса - кілограм /кг/, час - секунда /с/, сила електричного струму - ампер /А/, термодинамічна температура - кельвін /К/, кількість речовини -

моль /моль/, сила світла - кандела /кд/. Всі інші фізичні величини є похідними від основних і визначаються за певними математичними залежностями.

Основні фізичні величини вимірюються з певною точністю /ступенем відповідності результатів виміру дійсному значенню вимірюваної величини/. Ніяке вимірювання не може бути виконане абсолютно точно. Внаслідок цього результат виміру завжди включає в себе певну похибку.

Похибки вимірів діляться на три основні групи:

систематичні, які виникають внаслідок недосконалості вимірювальної техніки і методів вимірювання. Вони залишаються однаковими при багаторазовому повторенні одних і тих самих вимірів і враховуються шляхом внесення певних поправок;

випадкові; що виникають внаслідок дії причин, які неможливо врахувати раніше. Їх не можна врахувати внесенням поправок. Вплив їх оцінюється методами математичної статистики і теорії ймовірності;

грубі похибки, які викликані недостатньою увагою дослідника. Останні похибки повинні бути виключені з розгляду під час опрацювання результатів вимірів.

Похибки вимірів визначаються як відхилення результатів вимірів від дійсного значення величини. Різниця між дійсним значенням вимірюваної величини  $X$  і результатів вимірів  $X_B$ , отриманих за показами приладів, називається абсолютною похибкою

$$\Delta x = X - X_B .$$

Відношення абсолютної похибки до вимірюваного значення розглядуваної величини називається відносною похибкою

$$\sigma_B = \Delta x / X_B , \text{ чи } \sigma_B = (\Delta x / X_B) \cdot 100 .$$

Відносна похибка дає уявлення про якість вимірювання: чим менша відносна похибка, тим точніша вимірювана величина.

Точність вимірювальних приладів. Усі вимірювальні прилади мають певну похибку, яка належить до систематичних. На самому приладі чи в його паспорті наводиться найбільша абсолютна похибка  $\Delta X_{пр}$  приладу, яка стала для всієї шкали приладу /в особливо точних приладах абсолютна похибка буває змінною за шкалою і враховується за допомогою спеціальної таблиці поправок/.

На деяких приладах подається його клас точності

$$\delta_{\text{пр}} = \Delta X_{\text{пр}} / X_{\text{max}},$$

де  $X_{\text{max}}$  - максимальне значення шкали приладу.

За класом точності приладу можна визначити його найбільшу абсолютну похибку

$$\Delta X_{\text{пр}} = \delta_{\text{пр}} X_{\text{max}} / 100.$$

Якщо похибка приладу чи клас його точності невідомі, за найбільшу абсолютну похибку  $\Delta X_{\text{пр}}$  приладу приймається найменше значення поділки його шкали.

Похибки прямих вимірів /одноразові/. При прямих одноразових вимірах похибка визначається систематичною похибкою  $\Delta X_{\text{пр}}$  приладу. Результат вимірів отримують з точністю

$$X = X_{\text{в}} \pm \Delta X_{\text{пр}}.$$

Найбільш повне уявлення про точність вимірів дає відносна похибка виміру

$$\delta_{\text{в}} = (\Delta X_{\text{пр}} / X_{\text{в}}) 100 = \delta_{\text{пр}} X_{\text{max}} / X_{\text{в}}.$$

Оскільки абсолютна похибка стала для всієї шкали приладу, то відносна похибка  $\delta_{\text{в}}$  виміру, як видно з останньої формули, змінна і збільшується із зменшенням значення  $X_{\text{в}}$  вимірюваної величини.

Похибки прямих вимірів /багаторазові/. Багаторазові виміри виконують у тих випадках, коли їх точність визначається випадковою похибкою.

За результатами багаторазових вимірів розраховують середнє арифметичне значення  $\bar{X}$  вимірюваної величини, яке і є її найбільш імовірним значенням:

$$X = (X_1 + X_2 + \dots + X_m) / m = \sum_1^m X_i / m,$$

де  $X_1, X_2, \dots, X_m$  - результати окремих вимірів;  $m$  - число вимірів.

Принциповою особливістю випадкової похибки є те, що вона оцінюється двома показниками: величиною похибки, яку називають довірчим інтервалом, чи довірчою ймовірністю  $\psi$ , що вказує на те, з якою ймовірністю результат вимірювань не виходить за межі похибки. /Приклад запису результату вимірювання випадкової величини:

$X = 1,9 \pm 0,01$  з довірчою ймовірністю 0,9/.

Розрізняють два види випадкових похибок: середню квадратичну похибку /стандарт вимірів  $S_m$  /; похибку середнього арифметичного  $S_{\bar{x}}$ .

1. Середня квадратична похибка, чи стандарт, характеризує точність застосовуваного методу вимірів. Вона показує, на яку найбільшу величину може відхилитись результат разового виміру із  $m$  вимірів від середнього арифметичного значення вимірюваної величини:

$$S_m = \pm \sqrt{\frac{(\bar{x}-x_1)^2 + (\bar{x}-x_2)^2 + \dots + (\bar{x}-x_m)^2}{m-1}} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (\bar{x}-x_i)^2}{m-1}}$$

Відносне значення вимірюваної величини /коефіцієнт варіації середньої квадратичної похибки/

$$W_x = (S_m / \bar{x}) 100\%$$

Коли  $m \rightarrow \infty$ , середній квадратичній похибці  $S_m$  відповідає довірна ймовірність 0,68; подвоєній середній квадратичній похибці  $2S_m$  - довірна ймовірність 0,95; потрійній  $3S_m$  - 0,997.

2. Похибка середнього арифметичного вказує на те, з якою точністю отримано середнє арифметичне значення  $\bar{x}$  вимірюваної величини, і розраховується за формулами:

абсолютна

$$S_{\bar{x}} = (S_m / \sqrt{m}) t_{\psi, m},$$

відносна /коефіцієнт варіації похибки середнього арифметичного/

$$W_{\bar{x}} = \pm \frac{S_m}{\bar{x} \sqrt{m}} t_{\psi, m} 100\%$$

де  $t_{\psi, m}$  - коефіцієнт Стьюдента, який враховує вплив числа



вимірів на точність отриманого результату. Він залежить від прийнятої довірчої ймовірності  $\psi$  і числа вимірів  $m$  і визначається за табл. ДІ.

З поданих рівнянь видно, що похибка середнього арифметичного зменшується із збільшенням числа вимірів  $m$ . Виконуючи виміри, приймають довірчу ймовірність  $\psi = 0,9$ . Якщо в цьому випадку похибка середнього арифметичного  $S_{\bar{x}}$  перевищує бажані межі, дослід необхідно повторити, збільшивши число вимірів. Якщо це не приведе до бажаного результату, необхідно змінити методику вимірів.

Непрямі одноразові виміри. Похибка непрямих одноразових вимірів розраховується як функція похибок прямих вимірів, на підставі яких обчислюється вимірювана величина. Ці розрахунки виконуються за правилами, розробленими в теорії оцінок точності вимірів. Так, відносна похибка добутку і частки від ділення дорівнює сумі відносних похибок співмножників чи відповідно діленого і дільника.

Абсолютна похибка непрямих одноразових вимірів

$$\Delta x_i = \delta_i x_{B,i} / 100,$$

де  $\delta_i$  - відносна похибка непрямих вимірів відповідної величини, %;  
 $x_{B,i}$  - вимірне значення величини.

Непрямі багаторазові виміри. При непрямих багаторазових вимірах відносна похибка суми /різниці/, добутку і частки від ділення дорівнює кореню квадратному із суми квадратів відносних похибок відповідних незалежно вимірених величин:

$$W_i = \pm \sqrt{W_1^2 + W_2^2 + \dots + W_n^2}.$$

Відносна похибка середнього арифметичного  $W_{\bar{x}}$  обчислюється за цією самою формулою, тільки під знак радикала входять відповідні квадрати середньоарифметичних вимірених величин.

Абсолютні величини середнього квадратичного відхилення і похибки середнього арифметичного непрямих багаторазових вимірів розраховуються за формулами:

$$S_m = \pm \frac{W_x \bar{x}}{100},$$

$$S_{\bar{x}} = \pm \frac{W_{\bar{x}}}{100}.$$

Мета роботи: засвоїти конструкції, принцип дії, методики визначення в'язкості за допомогою віскозиметрів Освальда і Гепплера; навчитися вимірювати в'язкість різних рідин.

### I.1. Основні теоретичні питання

Під час руху реальної 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. Отже, можна зробити висновок, що в'язкістю визначається здатність рідини чинити опір зсуваючим чи дотичним зусиллям. Ця сила залежить від роду рідини, поверхні дотику шарів, відносної швидкості руху шарів  $dU/dn$ , і не залежить від тиску на рідину. Незалежність сили рідинного тертя від тиску обумовлена молекулярним тиском в рідині, який становить, наприклад, для води 1100 МПа, для етанолу 900 МПа.

Під відносною швидкістю потрібно розуміти приріст швидкості під час переходу від одного шару  $a$  до іншого  $b$  за глибиною потоку чи за нормаллю до напрямку руху, тобто величину  $grad U = dU/dn$ /рис. 1.1/.

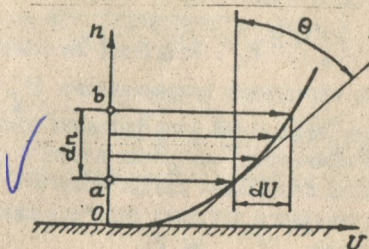


Рис. 1.1. Схема руху в'язкої рідини

Значення градієнта швидкості і його зміну можна визначити графічно, будуючи криву розподілу швидкостей в певному перерізі і проводячи в окремих точках дотичні до цієї кривої. Градієнт швидкості в такому разі буде дорівнювати тангенсу кута між дотичною і нормаллю до напрямку швидкості, тобто

$$\text{grad } U = \text{tg } \theta.$$

Математичним виразом гіпотези Ньютона є формула

$$T = \mu F \frac{dU}{dn}, \quad /I.I/$$

де  $T$  - сила внутрішнього тертя;  $\mu$  - коефіцієнт, який характеризує рід рідини /його називають динамічним, або абсолютним коефіцієнтом в'язкості/;  $F$  - площа спряжених шарів рідини;  $dU/dn$  - градієнт швидкості.

Із виразу /I.I/ виникає поняття про питому силу тертя чи дотичне напруження, тобто сили тертя на одиницю спряжених шарів рідини

$$\tau = \frac{T}{F} = \mu \frac{dU}{dn}.$$

З цього виразу видно, що коли  $\text{grad } U = 1$   $\mu = \tau$ . На цій підставі 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·с/.

У гідравліці часто зустрічається відношення динамічного коефіцієнта в'язкості  $\mu$  до густини рідини  $\rho$ , яке називають кінематичним коефіцієнтом в'язкості

$$\nu = \mu / \rho.$$

За одиницю виміру кінематичного коефіцієнта в'язкості прийнято квадратний метр за секунду /м<sup>2</sup>/с/.

Значення коефіцієнтів  $\mu$  і  $\nu$  для води залежно від температури наведено в табл. Д2.

Вивченням методів вимірювання в'язкості займається віскозиметрія. Широкий діапазон зміни в'язкості від  $10^{-5}$  Па·с для газів

до  $10^{12}$  Па·с для полімерів, а також необхідність вимірювання в'язкості в умовах низьких чи високих температур і тисків обумовлюють наявність значної кількості методів віскозиметрії і конструкцій відповідних приладів - віскозиметрів /від лат. *viscosus*- в'язкий, липкий і грец. *metrēō* - вимірюю/.

Існує декілька типів віскозиметрів, різних за конструктивними особливостями і принципом дії:

капілярні - визначається час протікання відомої кількості рідини крізь капілярні трубки /рис. 1.2/. До приладів такого типу відноситься віскозиметр Оствальда. За допомогою капілярних віскозиметрів визначається кінематичний коефіцієнт в'язкості  $\nu$  малов'язких рідин;

кульові - визначається час проходження падаючою кулькою проміжка між мітками каліброваної трубки, заповненої дослідною рідиною /рис. 1.3/. До приладів такого типу відноситься віскозиметр Гепплера. Знаючи діаметр кульки, густину матеріала, з якого вона виготовлена, густину рідини і час падіння кульки між двома мітками, можна визначити динамічний коефіцієнт в'язкості  $\mu$  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 проградуїрована в одиницях динамічної в'язкості  $\mu$  чи в одиницях, пропорційних  $\mu$  ;

ультразвукові - вимірюється швидкість затухання коливань магнітострикційних матеріалів, які знаходяться в дослідній рідині.

## 1.2. Конструкція і принцип дії лабораторних віскозиметрів.

### Віскозиметр Оствальда

Віскозиметр Оствальда /рис. 1.2/ являє собою U-подібну вертикальну трубку, яка складається з двох колін 1 і 2, в ліве коліно 2 впаяно капіляр 5. За допомогою цього віскозиметра вимірюється кінематичний коефіцієнт в'язкості  $\nu$  за часом витікання дослідної рідини від мітки 3 до мітки 4.

Для визначення часу перетікання рідини віскозиметр заповнюють дослідною рідиною до рівня трохи вищого кульки коліна 1 і спостерігають за тим, щоб в рідині не створювалися повітряні бульбашки.

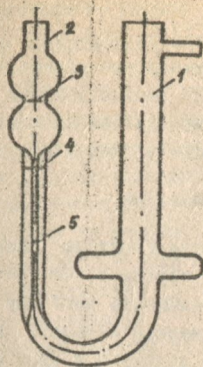


Рис. 1.2. Капілярний віскозиметр Оствальда

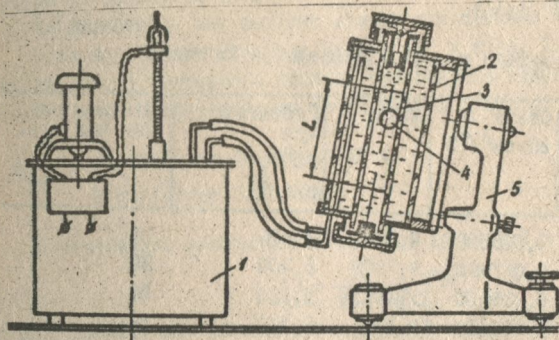


Рис. 1.3. Визначення в'язкості віскозиметром Геплера:  
 1 - термостат, 2 - зовнішній кожух, 3 - калібрована трубка,  
 4 - куля, 5 - штатив

Після цього заповнений віскозиметр встановлюють в термостат так, щоб розширення коліна 1 було нижче рівня рідини в термостаті. Після витримки в термостаті не менше 15 хв при заданій температурі засмоктують рідину в коліно 2, приблизно до половини висоти верхньої кульки. Визначають час переміщення меніска рідини від мітки 3 до мітки 4.

### Віскозиметр Гепплера

Основна частина віскозиметра Гепплера /рис. 1.8/ - внутрішня вимірювальна скляна калібрована трубка 3, яка встановлена під кутом  $10^{\circ}$  до вертикалі. У цю трубку наливають дослідну рідину і опускають кульку 4. На поверхні трубки нанесено кільцеві мітки на відстані  $\angle$  одна від одної. Час проходження кульки між цими мітками фіксується секундоміром. Вимірювальна трубка 3 знаходиться в скляному кожусі 2, заповненому протічною термостатованою рідиною, яка подається із термостата 1. Скляний кожух з вимірювальною трубкою закріплюється на штативі 5, який забезпечує вимірювальній частині приладу строго визначений кут нахилу і можливість повертати її навколо горизонтальної осі.

Кульки 4 виготовляються зі скла і спеціального залізонікелевого сплаву /табл. 1.1/.

Таблиця 1.1

#### Характеристики кульок віскозиметра Гепплера

Кулька	Діаметр, мм	Стала $K$ , $\text{сп.см}^3/^{\circ}\text{C}$	Маса, г	Густина кулі при $20^{\circ}\text{C}$ , $\text{г/см}^3$	Мінімальний час падіння, с
1	15,805	0,006888	4,9743	2,406	60
2	15,630	0,067560	4,7978	2,400	30
3	15,440	0,239200	15,6463	8,120	30
4	15,290	0,462000	15,1946	8,120	30
5	14,394	3,940000	12,6754	8,120	30
6	11,790	27,400000	6,9639	8,120	30

### 1.3. Методика проведення роботи

#### Віскозиметр Оствальда

1. Рідину, при довільній температурі, заливають у коліно I віскозиметра до заповнення кульки в цьому коліні.
2. Встановлюють віскозиметр з дослідною рідиною в термостат і витримують його при заданій температурі 15 хв.
3. Виймають термостатований віскозиметр з рідиною з термостата і засмоктують рідину із коліна I в коліно 2 до рівня, не меншого половини висоти верхньої кульки лівого коліна 2.
4. Припиняють засмоктування і, коли меніск рідини зрівняється з міткою 3, включають секундомір.
5. Після переміщення меніска рідини від мітки 3 до мітки 4 зупиняють секундомір.

#### Віскозиметр Гепплера

1. Калібровану скляну трубку 3 заповнюють дослідною рідиною.
2. Спеціальним пінцетом обережно опускають кульку 4 в трубку 3.
3. Дослідну рідину разом з кулькою нагрівають до заданої температури за допомогою прозорої побічної рідини з термостата I.
4. Визначають час падіння кульки між мітками трубки 3.  
Коли час її падіння буде менший ніж в табл. I.1, кульку міняють на іншу і повторюють дослід. Час падіння кульки в дослідній рідині повинен бути однаковим протягом трьох вимірів.

### 1.4. Опрацювання дослідних даних

#### Віскозиметр Оствальда

Кінематичний коефіцієнт в'язкості дослідної рідини,  $\text{мм}^2/\text{с}$ ,

$$\nu = \frac{g}{9,807} T K,$$

де  $g$  - прискорення вільного падіння в місті вимірювання в'язкості,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;  $T$  - час проходження дослідної рідини від мітки 3 до мітки 4, с;  $K$  - стала віскозиметра, яка береться з паспорта приладу,  $\text{мм}^2/\text{с}^2$ .

## Віскозиметр Гепплера

Розрахунок динамічного коефіцієнта в'язкості в сантипуазах /сп/ виконують за формулою

$$\mu = T(\rho_1 - \rho_2)K,$$

де  $T$  - тривалість падіння кульки, с;  $\rho_1$  - густина матеріалу кульки, г/см<sup>3</sup>;  $\rho_2$  - густина дослідної рідини при відповідній температурі, г/см<sup>3</sup>;  $K$  - стала кульки, сП·см<sup>3</sup>/°С.

Значення  $\rho_1$  і  $K$  для кожної кульки наведено в табл. I.1.

### Результати вимірів

Отримані дані, результати вимірів і розрахунків заносять у табл. I.2.

### Контрольні запитання

1. Чим викликане внутрішнє тертя при течії рідини?
2. Фізичний зміст поняття "в'язкість".
3. Гіпотеза Ньютонa.
4. Що являє собою градієнт швидкості і чим він викликаний?
5. Графічне тлумачення градієнту швидкості.
6. Математичне тлумачення гіпотези Ньютонa.
7. Що являє собою дотичне напруження?
8. Динамічний коефіцієнт в'язкості та одиниця його виміру в СІ.
9. Кінематичний коефіцієнт в'язкості та одиниця його виміру.
10. Що вивчає віскозиметрія?
11. Капілярні віскозиметри.
12. Кулькові віскозиметри.
13. Ротаційні та ультразвукові віскозиметри.
14. Конструкція віскозиметра Оствальда.
15. Конструкція віскозиметра Гепплера.
16. Порядок проведення дослідів на віскозиметрах Оствальда і Гепплера.
17. Порядок опрацювання дослідних даних, отриманих на віскозиметрах Оствальда і Гепплера.





## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления.- М.: Недра, 1982.- 223 с.
2. Альтшуль А.Д., Животовский Л.С., Иванов Л.П. Гидравлика и аэродинамика.- М.: Стройиздат, 1987.- 414 с.
3. Байбаков О.В., Бутаев Д.А., Калмыков З.А. Лабораторный курс гидравлики, насосов и гидропередач.- М.: машиностроение, 1974.- 416 с.
4. Большаков В.А., Попов В.Н. Гидравлика.- к.: Выща шк., 1989.- 215 с.
5. Гидравлика, гидравлические машины и основы гидропривода/ Ю.П.Грачев, В.И.Митрофанов, И.М.Савина и др.- М.: МГИИП, 1972.- 146 с.
6. Гидравлика, гидромашини и гидроприводы/ Т.М.Башта, С.С.Руднев, Б.Б.Некрасов и др.- М.: Машиностроение, 1982.- 423 с.
7. Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика.- М.: Машиностроение, 1987.- 440 с.
8. Каминер А.А., Яхно О.М. Гидромеханика в инженерной практике.- К.: Техника, 1987.- 175 с.
9. Константинов Ю.М. Гидравлика.- К.: Выща шк., 1988.- 398 с.
10. Курылев Б.С., Герасимов Н.А. Примеры, расчеты и лабораторные работы по холодильным установкам.- Л.: Машиностроение, 1971.- 256 с.
11. Маковозов В.М. Гидравлика и гидравлические машины.- М.: Машгиз, 1962.- 427 с.
12. Методические указания к проведению лабораторных работ/ Г.Е.Руденко-Грицюк, И.Г.Зеленюк, И.К.Мотуз и др.- К.: КТИИП, 1984.- 79 с.
13. Методичні вказівки до вивчення дисципліни "Гідравліка та гідравлічні машини"/ І.К.Мотуз, В.М.Герасименко, В.Р.Кулінченко.- К.: КТИИП, 1991.- 106 с.
14. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений.- М.; Л.: Энергоатомиздат, 1985.- 248 с.
15. Черкасский В.М. Насосы, вентиляторы, компрессоры.- М.: Энергоатомиздат, 1984.- 416 с.
16. Шиличенко З.С. Насосы, компрессоры, вентиляторы.- К.: Техника, 1976.- 368 с.
17. Штернлихт Д.В. Гидравлика.- М.: Энергоатомиздат, 1984.- 638 с.

## ЗМІСТ

Загальні положення . . . . .	4
Аналіз результатів вимірювань . . . . .	5
Розділ I. ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ РІДИН. ГІДРОСТАТИКА . . . . .	10
Лабораторна робота № 1. Вимірювання в'язкості рідин . . . . .	10
Лабораторна робота № 2. Вимірювання тиску в посудинах і трубопроводах . . . . .	18
Лабораторна робота № 3. Визначення тиску в різних місцях посудини з рідиною . . . . .	28
Лабораторна робота № 4. Витратна характеристика посудини Маріотта . . . . .	32
Лабораторна робота № 5. Застосування закону Паскаля. Гідравлічний прес . . . . .	38
Лабораторна робота № 6. Гідравлічний акумулятор . . . . .	43
Лабораторна робота № 7. Обертання циліндричної посудини з рідиною навколо вертикальної осі . . . . .	47
Лабораторна робота № 8. Сила тиску рідини на похилу стінку . . . . .	53
Лабораторна робота № 9. Визначення вертикальної складової повного тиску рідини на криволінійну поверхню . . . . .	59
Лабораторна робота № 10. Дослідна перевірка закону Архімеда . . . . .	63
Розділ II. ГІДРОДИНАМІКА . . . . .	66
Лабораторна робота № 11. Дослідна перевірка рівняння Бернуллі . . . . .	66
Лабораторна робота № 12. Визначення втрат питомої енергії /напору/ на підставі рівняння Бернуллі . . . . .	73
Лабораторна робота № 13. Градування витратоміра Вентурі . . . . .	77
Лабораторна робота № 14. Визначення режимів руху рідин за числами Рейнольдса . . . . .	84
Лабораторна робота № 15. Вимірювання поля швидкостей у трубо- проводі за допомогою трубки Піто . . . . .	92
Лабораторна робота № 16. Градування витратомірної діафрагми . . . . .	97
Лабораторна робота № 17. Дослідне визначення коефіцієнта опору тертя та еквівалентної шорсткості . . . . .	103
Лабораторна робота № 18. Дослідне визначення коефіцієнтів місцевих опорів . . . . .	112

Лабораторна робота № 19.	Дослідження кавітації у витратомірній діафрагмі . . . . .	118
Лабораторна робота № 20.	Дослідження гідравлічного удару в трубах . . . . .	125
Лабораторна робота № 21.	Дослідження роботи гідравлічного тарана . . . . .	131
Лабораторна робота № 22.	Витікання рідини із малого отвору в тонкій стінці . . . . .	134
Лабораторна робота № 23.	Витікання рідини через насадки . . . . .	142
Лабораторна робота № 24.	Визначення величини вакууму в насадках . . . . .	150
Лабораторна робота № 25.	Витікання рідини через отвір при змінному напорі . . . . .	156
Лабораторна робота № 26.	Дія струменя на нерухому перешкоду	159
Розділ III. ГІДРАВЛІЧНІ МАШИНИ . . . . .		166
Лабораторна робота № 27.	Монтаж насосів, компресорів і вентиляторів . . . . .	166
Лабораторна робота № 28.	Встановлення електродвигуна і перевірка співвісності валів . . . . .	169
Лабораторна робота № 29.	Випробування відцентрового насоса	173
Лабораторна робота № 30.	кавітаційні випробування відцентрового насоса . . . . .	180
Лабораторна робота № 31.	Визначення головної теоретичної характеристики відцентрового насоса . . . . .	187
Лабораторна робота № 32.	Вибір типу і марки насоса за каталогом . . . . .	193
Лабораторна робота № 33.	Паралельна робота відцентрових насосів . . . . .	197
Лабораторна робота № 34.	Послідовна робота відцентрових насосів . . . . .	202
Лабораторна робота № 35.	Випробування відцентрового вентилятора . . . . .	205
Лабораторна робота № 36.	Індикаторна діаграма поршневого насоса . . . . .	214
Лабораторна робота № 37.	Випробування поршневого компресора . . . . .	221
Лабораторна робота № 38.	Визначення спрацювання пер тертя гідравлічних машин . . . . .	233

0.60  
0.07  
0.2  
2.5  
0.1

Додаток . . . . .	236
Список літератури . . . . .	244