

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Міністерство освіти і науки України

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного

менеджменту

Дуфенюк Андрій Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.121

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Дослідження методів контролю поверхневого натягу рідин

(назва роботи)

Метрологія та вимірювальна техніка

(назва освітньої програми)

175 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(шифр і назва спеціальності)

Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:

Здобувач освітнього ступеня _____ Дуфенюк А. М.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник _____ Біліщук В. Б., к.т.н., доцент

(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

_____ В. С. Цих

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Івано-Франківськ – 2025

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту

Освітній рівень магістр

Спеціальність 175 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІВТ

« ___ » _____ 20__ року

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Дуфенюку Андрію Миколайовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження методів контролю поверхневого натягу рідин
керівник роботи, Біліщук В. Б., к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від 5 грудня 2025 року № 752/7

2. Строк подання студентом роботи 31 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: діапазон зміни поверхневого натягу 5-60 мН/м,
діапазон зміни густини рідин 700 -1000 кг/м³

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз методів і засобів контролю поверхневого натягу рідин.
2. Дослідження методик контролю поверхневого натягу рідин 3. Дослідження особливостей приладів для контролю поверхневого натягу рідин. 4. Метрологічні дослідження методів контролю поверхневого натягу рідин

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Теоретичний аналіз методу меніска біля вертикальної стінки. 2. Теоретичний аналіз методу двох менісків. 3. Схема установки контролю поверхневого натягу методом меніска біля вертикальної стінки. 4. Схема установки для контролю поверхневого натягу методом двох менісків. 5. Аналіз накопичення похибок методом контролю поверхневого натягу меніска біля вертикальної стінки. 6. Аналіз накопичення похибок контролю поверхневого натягу методом двох менісків

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 1 грудня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз методів і засобів контролю поверхневого натягу рідин	08.12.2025 р.	
2	Дослідження методик контролю поверхневого натягу рідин	11.11.2025 р.	
3	Дослідження особливостей приладів для контролю поверхневого натягу рідин	22.12.2025 р.	
4	Метрологічні дослідження методів контролю поверхневого натягу рідин	26.12.2025 р.	

Студент _____ Дуфенюк А. М. _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Біліщук В. Б. _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 58 с., 22 рис., 33 джерел, 6 аркушів креслень.

Об'єкт дослідження – методи визначення поверхневого натягу рідини.

Мета роботи – дослідження методів контролю поверхневого натягу рідин.

Метод дослідження – математичне моделювання фізичних процесів на поверхні розділу рідкої і газоподібної фаз.

Зроблений аналіз відомих методів та засобів контролю поверхневого натягу рідин. Досліджено методи контролю поверхневого натягу меніска біля вертикальної стінки і двох менісків. Запропоновано визначати поверхневий натяг рідин трьома варіантами методу меніска біля вертикальної стінки на основі вимірювання наступних параметрів: висоти меніска, різниці горизонтальної відстані і вимірювання кутів у двох точках меніска і різниці вертикальної відстані і вимірювання кутів у двох точках меніска. Запропоновано визначати поверхневий натяг рідин методом двох менісків на основі вимірювання відстані між менісками і радіусу нижнього меніска. Розроблено функціональні схеми приладів для контролю поверхневого натягу рідини, які реалізують досліджені методи. Здійснений аналіз похибок, які виникають при контролі поверхневого натягу рідин дослідженими методами.

ПОВЕРХНЕВА ЕНЕРГІЯ, РІДИНА, МЕНІСК, ПОХИБКИ.

ABSTRACT

Master's thesis: 58 pages, 22 figures, 33 sources, 6 sheets of drawings.

The object of research - methods for determining the surface energy of a liquid.

The purpose of the work is to study the methods of surface energy control of a liquid.

Research method - mathematical modeling of physical processes on the interface of liquid and gaseous phases.

The analysis of known methods and means of control of surface energy of liquids is made. Methods of control of surface energy of a meniscus near a vertical wall and two menisci are investigated. It is proposed to determine the surface energy of liquids by three variants of the meniscus method near the vertical wall based on measuring the following parameters: meniscus height, horizontal distance difference and measuring angles at two meniscus points and vertical distance difference and measuring angles at two meniscus points. It is proposed to determine the surface energy of liquids by the method of two menisci based on measuring the distance between the menisci and the radius of the lower meniscus. Functional schemes of devices for control of surface energy of liquid which implement the investigated methods are developed. The analysis of errors which arise at control of surface energy of liquids by the investigated methods is carried out.

SURFACE ENERGY, LIQUID, MENISK, ERRORS.

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 Аналіз методів і засобів контролю поверхневого натягу рідин.....	7
1.1 Поняття поверхневого натягу рідин	7
1.2 Аналіз методів контролю поверхневого натягу рідин	12
1.3 Аналіз приладів для контролю поверхневого натягу.....	22
Висновки до розділу	26
2 Дослідження методик контролю поверхневого натягу рідин	27
2.1 Метод меніска біля плоскої стінки.....	27
2.2 Метод двох менісків	32
Висновки до розділу	33
3 Дослідження особливостей приладів для контролю поверхневого натягу рідин	35
3.1 Розроблення функціональної схеми приладу контролю поверхневого натягу рідин з горизонтальним зміщенням променя лазера.....	35
3.2 Розроблення функціональної схеми приладу контролю поверхневого натягу рідин з вертикальним зміщенням променя лазера	36
3.3 Розроблення функціональної схеми приладу контролю поверхневого натягу рідин методом двох менісків	38
Висновки до розділу	39
4 Метрологічні дослідження методів контролю поверхневого натягу рідин	40
4.1 Аналіз складових невизначеностей контролю.....	40
4.2 Аналіз похибок методу меніска біля плоскої стінки.....	44
4.3 Аналіз похибок методу двох менісків	49
Висновки до розділу	51
Висновки	52
Список використаних джерел	53

ВСТУП

Актуальність теми. Чому поверхневий натяг настільки важливий? Хоча ця властивість рідин, безумовно, цікава, вона, здається, не відіграє великої ролі в нашому повсякденному житті, але це не так. Для води характерна високий поверхневий натяг. Ця властивість має важливе значення для пересування розчинів тканинами (кровообіг, висхідний та спадний токи в рослинах). Багатьом дрібним організмам поверхневий натяг дозволяє утримуватися на воді або ковзати її поверхнею. У деяких галузях поверхневий натяг є більш простим показником забруднення харчових продуктів. Оскільки поверхневий натяг визначається на молекулярному рівні, будь-яка зміна компонентів рідини, поверхнево-активних речовин, палива або сполук в рідині може призвести до зміни поверхневого натягу. Якщо поверхневий натяг абсолютно чистого рідини відома, будь-яке відхилення від нього дозволить виявити певний рівень забруднення.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є дослідження методу контролю поверхневого натягу рідин меніска біля вертикальної стінки і методу двох менісків для виявлення оптимальної кількості параметрів, що вимірюють при визначенні поверхневого натягу рідин.

Відповідно до цієї мети необхідно вирішити такі задачі:

- здійснити аналіз відомих методів і технічних засобів контролю поверхневого натягу рідин;
- зробити дослідження методів меніска біля вертикальної стінки і методу двох менісків;
- розробити функціональні схеми приладів для контролю поверхневого натягу рідин дослідженими методами;
- здійснити метрологічний аналіз досліджених методів.

Об'єктом дослідження є поверхневі властивості рідини.

Предметом дослідження є метод меніска біля вертикальної стінки і метод двох менісків для контролю поверхневого натягу рідин.

Методи дослідження. У роботі для розв'язання поставлених задач використовувалися теорія капілярності Лапласа, методи теорії похибок.

Наукова новизна отриманих результатів. Запропоновано визначення поверхневого натягу рідин на основі вимірювання: висоти меніска і кута змочування на лінії трифазного контакту; горизонтальної або вертикальної відстані між двома точками і кутів нахилу меніска методом меніска біля вертикальної стінки. Запропоновано визначення поверхневого натягу рідин на основі вимірювання відстані між менісками і радіусу нижнього меніска методом двох менісків.

Практичне значення отриманих результатів:

- розроблено функціональні схеми приладів для контролю поверхневого натягу рідин дослідженими методом меніска біля вертикальної стінки і методом двох менісків;
- зроблений аналіз похибок досліджених методів.

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИН

1.1 Поняття поверхневого натягу рідин

Поверхневий натяг(або поверхневий натяг) — це фізичне явище, що змушує рідини зменшувати площу своєї поверхні до мінімуму при сталому об'ємі. Саме тому краплі рідини набувають майже сферичної форми, а також виникає капілярний ефект. Це явище спостерігається на межі рідини з газом або між двома різними рідинами.

Будь-яка однорідна речовина може існувати як у газоподібному, так і в рідкому стані, залежно від умов. Проте газу та рідини суттєво відрізняються за своїми властивостями. Хоча обидва стани не мають власної форми і приймають форму посудини, рідини, на відміну від газів, мають сталий об'єм і майже нестисливі. Газу ж не мають фіксованого об'єму і легко стискаються. Плинність рідин пояснюється здатністю їхніх молекул вільно переміщатися одна відносно одної.

Найважливіша відмінність рідин від газів полягає в тому, що рідини утворюють вільну поверхню на межі з газом. Молекули всередині рідини оточені іншими молекулами з усіх боків, тому сили притягання між ними взаємно компенсуються. Однак молекули, що знаходяться на поверхні розділу, відчувають некомпенсовану результуючу силу притягання, спрямовану всередину рідини. Це означає, що молекули на поверхні мають так звану надлишкову поверхневий натяг .

Через меншу кількість молекул на поверхні та збільшену відстань між ними, поверхневий шар рідини перебуває у розтягнутому стані, а між його молекулами діють сили притягання, що називаються силами поверхневого натягу. Оскільки куля має найменшу площу поверхні серед усіх тіл певного об'єму, рідина, за відсутності або мінімального впливу зовнішніх сил, набуває саме такої форми [1].

Поверхневий натяг має подвійний фізичний зміст - енергетичну

(термодинамічну) і силову (механічну).

Поверхневий натягає два основні визначення:

1) з енергетичної (термодинамічної) точки зору: це кількість роботи, яку потрібно виконати для збільшення площі поверхні рідини за умови постійної температури;

2) з силової (механічної) точки зору: поверхневий натяг — це сила, що діє на одиницю довжини межі рідкої поверхні.

Ця сила поверхневого натягу завжди спрямована дотично до поверхні рідини, перпендикулярно до ділянки контуру, на яку вона діє, і її величина прямо пропорційна довжині цієї ділянки.

Поверхневий натяг може виникати на межі між газами, рідинами та твердими тілами. Зазвичай під цим терміном розуміють натяг на межі "рідина-газ". Однак, якщо йдеться про межу між двома рідинами, поверхневий натяг також можна розглядати як силу, що діє на одиницю довжини контуру поверхні, прагнучи мінімізувати її площу при фіксованих об'ємах фаз [2].

Молекули рідини розташовані щільно одна до одної, тому їхня густина значно вища, ніж у газів (де відстань між молекулами в сотні разів більша за їхні розміри). У рідинах кожна молекула деякий час коливається навколо певного положення, а потім стрибкоподібно переміщується в нове. Це зумовлює повільний рух молекул по всій масі рідини та значно повільнішу дифузію порівняно з газами. Зі зростанням температури інтенсивність коливань молекул збільшується, їхня рухливість зростає, що призводить до зменшення в'язкості рідини.

Рідина також характеризується наявністю поверхневого натягу. Вона виникає через те, що молекули на поверхні рідини взаємодіють з іншими молекулами інакше, ніж ті, що знаходяться всередині об'єму. Зокрема, молекула всередині рідини рівномірно оточена іншими молекулами з усіх боків, тому сили притягання, що діють на неї, в середньому компенсуються, і результуюча сила дорівнює нулю. Однак у при поверхневому шарі, де з одного боку знаходиться рідина, а з іншого — значно менш щільне газоподібне середовище, молекула притягується сильніше до молекул рідини, ніж до молекул газу.

Отже, результуюча сила, що діє на молекули поверхневого шару, не дорівнює нулю і спрямована вглиб рідини. Під впливом цієї сили молекули втягуються

всередину, що призводить до мінімізації вільної поверхні рідини. Саме тому, за відсутності інших впливів, рідина набуває форми кулі, оскільки куля має найменшу площу поверхні для заданого об'єму. Це підтверджується спостереженнями за дрібними краплями в повітрі (які майже сферичні, але деформовані гравітацією) та експериментами в невагомості, де краплі ідеально сферичні.

Загальна енергія частинок рідини складається з енергії їхнього хаотичного руху (теплової) та потенційної енергії міжмолекулярної взаємодії. Щоб перемістити молекулу з глибини рідини на її поверхню, необхідно виконати роботу. Ця робота витрачається з кінетичної енергії молекул і перетворюється на збільшення їхньої потенційної енергії. Таким чином, молекули на поверхні рідини мають вищу потенційну енергію, ніж ті, що знаходяться всередині. Ця додаткова енергія поверхневих молекул, яка пропорційна площі поверхні dS , і називається поверхневою енергією:

$$dP = \gamma dS, \quad (1.1)$$

де γ – величина поверхневого натягу [3].

Поверхневий шар рідини відрізняється від її внутрішньої частини тим, що результуюча сила міжмолекулярної взаємодії на поверхні не дорівнює нулю (рис. 1.1). Ця некомпенсована сила створює так званий молекулярний тиск, який, у свою чергу, зумовлює виникнення поверхневої (потенціальної) енергії, що прямо пропорційна площі поверхні ΔS :

$$\Delta W = \gamma \Delta S.$$

Поверхневий натяг— це робота, яку потрібно затратити, щоб збільшити площу поверхні на ΔS , тобто $\Delta W = A$. Далі буде розглянуто розмірність поверхневого натягу:

$$[\gamma] = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} = \frac{\text{Н}}{\text{м}}.$$

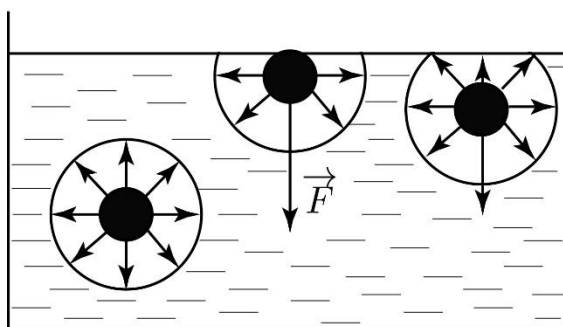
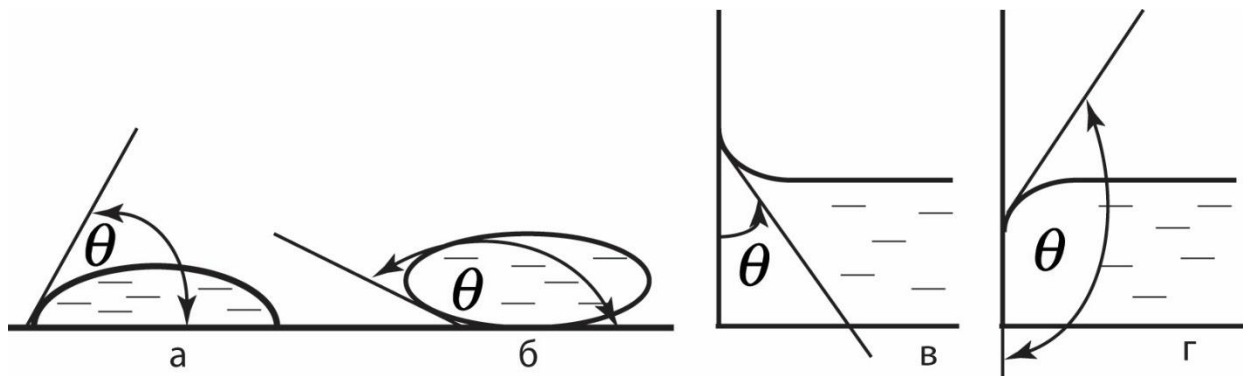


Рисунок 1.1 – Дія міжмолекулярних сил

Поверхневий натяг можна визначати як силу яка діє на одиницю довжини плівки:

$$\gamma = \frac{F}{l}. \quad (1.2)$$

Коли крапля рідини контактує з твердою поверхнею, вона розтікається, якщо сили притягання між молекулами рідини та твердого тіла перевищують сили притягання між молекулами самої рідини. Це явище називається змочуванням (рис. 1.2, а, в), і кут, який утворюється між поверхнею рідини та твердим тілом, називається крайовим кутом θ . У випадку, коли сили притягання між молекулами рідини сильніші, ніж між молекулами рідини та твердого тіла, відбувається явище незмочування (рис. 1.2, б, г).



а – форма краплі рідини на горизонтальній поверхні при змочуванні, б – форма краплі рідини на горизонтальній поверхні за відсутності змочування, в – форма меніска рідини біля вертикальної поверхні при змочуванні, г – форма меніска рідини біля вертикальної поверхні за відсутності змочування

Рисунок 1.2 – Крайовий кут змочування

Явища змочування та незмочування призводять до викривлення поверхні рідини, утворюючи меніск біля стінок посудини (рис. 1.2, в,г). Через поверхневий натяг, яка прагне мінімізувати площу поверхні, під викривленим меніском виникає додатковий тиск Δp . Опуклий меніск збільшує тиск на рідину, спрямовуючи його вниз, тоді як увігнутий меніск зменшує тиск. Щоб визначити величину цього додаткового тиску, розглянемо роботу сил поверхневого натягу, необхідну для зменшення площі поверхні сферичної краплі радіусом R на величину dS та зменшення її об'єму на dV :

$$dA = \alpha \cdot dS = \Delta p \cdot dV, \quad (1.3)$$

де $S = 4\pi R^2$; $dS = 8\pi R dR$; $V = 4\pi R^3/3$; $dV = 4\pi R^2 dR$.

Підставивши dS і dR у формулу, отримаємо:

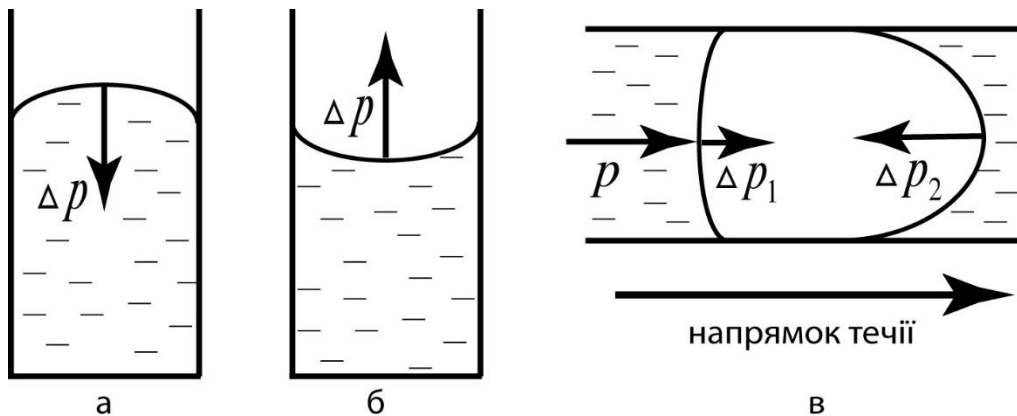
$$\Delta p = \frac{2\gamma}{R}. \quad (1.4)$$

У випадку викривленої поверхні рідини з двома радіусами кривизни R_1 і R_2 , додатковий тиск під меніском визначається за допомогою формули Лапласа:

$$\Delta p = \pm \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

З формули випливає, що додатковий тиск обернено пропорційний радіусу кривизни, тому його вплив особливо помітний у вузьких трубках, відомих як капіляри. У випадку, коли рідина тече через трубку, викривлення поверхні рідини може змінюватися, створюючи додатковий тиск, який протидіє потоку (рис. 1.3, в). Це може навіть зупинити потік рідини в трубках малого діаметру. Зміна висоти рівня рідини в тонких трубках називається капілярністю. Висоту, на яку піднімається або опускається рідина в капілярі, можна визначити, враховуючи рівновагу додаткового тиску та гідростатичного тиску (рис. 1.3, а, б):

$$\frac{2\gamma}{R} = \rho gh. \quad (1.5)$$



а, б – нерухомий меніск рідини у вертикальному капілярі, в – рухомий меніск рідини в горизонтальному капілярі

Рисунок 1.3 – Напрямок дії додаткового тиску і викривлення поверхні меніска рідини

Висота зміни рівня рідини в капілярі:

$$h = \frac{2\gamma}{\rho g r} = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho g r}, \quad (1.6)$$

де $R=r/\cos \theta$ – радіус кривизни меніска; r – радіус капіляра.

Поверхневий натяг рідини залежить від її хімічного складу, типу міжмолекулярних сил, температури та наявності домішок. Речовини, які зменшують поверхневий натяг, називаються поверхнево-активними речовинами (ПАР). Вони широко використовуються в миючих засобах, піноутворювачах, емульгаторах та відіграють важливу роль у різноманітних біологічних процесах на клітинному рівні.

Чому поверхневий натяг настільки важлива? Хоча ця властивість рідин, безумовно, цікава, вона, здається, не відіграє великої ролі в нашому повсякденному житті, але це не так. Для води характерний високий поверхневий натяг. Ця властивість має важливе значення для пересування розчинів тканинами (кровообіг, висхідний та спадний токи в рослинах). Багатьом дрібним організмам поверхневий натяг дозволяє утримуватися на воді або ковзати її поверхнею. У деяких галузях поверхневий натяг є більш простим показником забруднення харчових продуктів. Оскільки поверхневий натяг визначається на молекулярному рівні, будь-яка зміна компонентів рідини, поверхнево-активних речовин, палива або сполук в рідині може призвести до зміни поверхневого натягу. Якщо поверхневий натяг абсолютно чистого рідини відома, будь-яке відхилення від нього дозволить виявити певний рівень забруднення.

1.2 Аналіз методів контролю поверхневого натягу рідин

Методи вимірювання поверхневого натягу поділяються на статичні та динамічні. Статичні методи застосовують для визначення поверхневого натягу на сформованій поверхні в стані рівноваги. Динамічні методи базуються на процесах, пов'язаних з руйнуванням поверхневого шару. При вимірюванні поверхневого натягу розчинів, особливо поверхнево-активних речовин або полімерів, рекомендується використовувати статичні методи. У деяких випадках, наприклад,

для концентрованих розчинів полімерів з високою в'язкістю, досягнення рівноваги може займати кілька годин. Динамічні методи дозволяють визначити як рівноважну, так і динамічну поверхневий натяг. Наприклад, для розчину поверхнево-активної речовини після перемішування поверхневий натяг може становити 58 мДж/м², а після відстоювання - 35 мДж/м², тобто поверхневий натяг зменшується з часом. До досягнення рівноваги поверхневий натяг буде динамічним [5].

Статичні методи:

- а) метод Вільгельмі,
- б) метод підняття в капілярі,
- в) метод лежачої або звисаючої краплі,
- г) метод обертової краплі.

Динамічні методи:

- а) сталагмометричний, або метод рахунку крапель,
- б) метод відриву кільця (метод Дю Нуї),
- в) метод максимального тиску в бульбашці,
- г) метод осцилюючого струменя.

В методі підняття рідини в круглому капілярі поверхневий натяг γ визначають так:

$$\gamma = \frac{hr\rho g}{2} \quad (1.7)$$

де h - висота переміщення (догори або вниз) рідини в капілярі, м; r - радіус капіляра, м; ρ - густина рідини, кг/м³; g - константа прискорення вільного падіння, 9,81 м/с².

Метод Траубе передбачає використання сталагмометра для підрахунку кількості крапель стандартної рідини n_0 та досліджуваної рідини n_x , що утворюються в певному об'ємі цих рідин:

$$\gamma = \frac{\gamma_0 n_0 \rho}{n_x \rho} \quad (1.8)$$

де ρ_0 і ρ_x - густини стандартної та досліджуваної рідин відповідно, кг/м³; γ_0 - поверхневий натяг стандартної рідини, Н/м.

У методі Дю Нуї, або методі відриву кільця, платинове кільце повільно піднімають з рідини, яку воно змочує. Вимірюють силу F , яка необхідна для

подолання сили зчеплення між кільцем і рідиною та відриву кільця від поверхні. Ця сила пропорційна поверхневому натягу рідини γ , вимірюваній в Ньютонах на метр (Н/м):

$$F=K\cdot\gamma \quad (1.9)$$

де K - це константа, яка залежить від діаметра дроту, розмірів кільця та кута змочування. Значення K визначають за допомогою рідини, поверхневий натяг якої відомий, наприклад, води.

Метод максимального тиску в пухирці повітря широко використовують для визначення поверхневого натягу рідин на межі з повітрям. У цьому методі вертикально встановлений капіляр занурюють в рідину, і під тиском повітря на кінці капіляра формується повітряний пухирець. Поверхневий натяг рідини визначається за тиском, при якому пухирець досягає критичного розміру та прориває поверхню рідини:

$$\gamma_x = \frac{\gamma_0 P_x}{P_0} \quad (1.10)$$

де γ_0 - поверхневий натяг стандартної рідини, Н/м; P_x і P_0 - тиски, Н/м², необхідні для проскакування пухирця крізь поверхню досліджуваної та стандартної рідин відповідно.

Залежність поверхневого натягу розчину від концентрації поверхнево-активної речовини описується рівнянням Шишковського:

$$\gamma_0 - \gamma = a \cdot \ln(1 + b \cdot C), \quad (1.11)$$

де C - концентрація розчину, кмоль/м³; a і b - емпіричні константи.

Дисперсні системи характеризуються надлишком вільної поверхневого натягу, який визначається як добуток поверхневого натягу γ на питому площу поверхні S_{nut} , тобто $F = \gamma \cdot S_{nut}$. Зменшення цієї енергії може відбуватися як за рахунок зменшення площі поверхні, так і за рахунок зниження поверхневого натягу. Зменшення поверхні при зміні форми тіла характерно для рідин. Сильно подрібнені тверді та рідкі тіла з великим надлишком поверхневого натягу прагнуть зменшити її шляхом коагуляції (злипання) або коалесценції (злиття). Адсорбція є одним із процесів, що виникають внаслідок прагнення системи до зниження поверхневого натягу. [6]

Адсорбція — це процес перерозподілу компонентів системи між поверхневим

шаром та об'ємом фази. В багатокомпонентних системах розподіл йде таким чином, щоб в поверхневий шар переходив той компонент, який найбільше знижує поверхневий натяг. В однокомпонентних системах утворення поверхневого шару супроводжується зміною його структури, що називають автоадсорбцією. Залежно від агрегатного стану фаз, що контактують, розрізняють різні види адсорбції: адсорбція розчинених речовин на межі тверде тіло-рідина та рідина-рідина, адсорбція газів на твердих адсорбентах і адсорбція на межі рідкий розчин-газ. [6]

В стані рівноваги в системі, кількість адсорбованої речовини в поверхневому шарі залежить від температури та концентрації або парціального тиску цього компонента в об'ємі. Для кількісного опису адсорбції використовують такі залежності:

а) рівняння Гіббса:

$$\Gamma = -\frac{C}{R \cdot T} \cdot \frac{\partial \gamma}{\partial C} = \frac{C\phi}{R \cdot T} \quad (1.12)$$

де Γ – величина адсорбції, кмоль/м², C – концентрація розчину, кмоль/м³, $R = 8314$ Дж (кмоль·К)⁻¹ - універсальна газова константа; T - температура, К, $\phi = (-\partial\gamma/\partial C)$ – міра поверхневої активності Дж·м·кмоль⁻¹;

б) рівняння Ленгмюра:

$$\Gamma = \frac{\Gamma_{\infty} \cdot K \cdot C}{1 + (K \cdot C)}, \quad (1.13)$$

або

$$\Gamma = \frac{\Gamma_{\infty} \cdot K_1 \cdot P}{1 + (K_1 \cdot P)}, \quad (1.14)$$

де Γ - величина адсорбції, кмоль/м²; Γ_{∞} - максимальна кількість речовини, що адсорбується, кмоль/м²; K , (кмоль/м³)⁻¹ або K_1 , Па⁻¹ - константи, що характеризують поверхневу активність речовини; C - рівноважна концентрація розчиненої речовини, кмоль/м³; P - рівноважний тиск адсорбтива в системі, Па.

в) рівняння ізотерми БЕТ для полімолекулярної адсорбції:

$$A = \frac{A_{\infty} \cdot K \cdot (P / P_s)}{[1 - (P / P_s)] \cdot [1 + (K - 1) \cdot (P / P_s)]}, \quad (1.15)$$

де A - величина адсорбції, кмоль/м²; A_{∞} - максимальна кількість адсорбтива, кмоль/м²; K - константа, що характеризує енергію взаємодії молекул в

адсорбційному шарі; P - рівноважний тиск адсорбтива в системі, Па, P_s - тиск насиченої пари адсорбтива в системі, Па (наводяться в довідниках);

г) рівняння ізотерми Бедеккера-Фрейндліха:

$$\Gamma = \beta_1 \cdot P^{1/n} - \text{для газів,}$$

$$\Gamma = \beta_2 \cdot C^{1/n} - \text{для розчинів,}$$

де P - рівноважний тиск газоподібного адсорбтива, Па; C - рівноважна концентрація, що встановилася в системі після адсорбції, кмоль/м³; β_1 і β_2 - постійні величини, розмірність яких залежить від властивостей адсорбенту та адсорбтива; $1/n$ - константа, що характеризує ступінь наближення параболічної ділянки ізотерми адсорбції до прямої лінії, змінюється в інтервалі від 0 до 1. [6]

Методи лежачої та звисаючої краплі є поширеними способами визначення поверхневого натягу. Експериментальні підходи до методів висячої та лежачої крапель схожі. Вони відрізняються способом формування краплі та методикою розрахунку поверхневого натягу, але в основному вони зосереджені на отриманні чіткого зображення краплі та вимірюванні координат відповідних точок поверхні. Застосування сучасних оптико-електронних систем дозволяє швидко вимірювати геометричні розміри та визначати крайові кути натікання та відтікання. Квінке вперше використав метод лежачої краплі для визначення поверхневого натягу [7, 8]. Для крапель, які погано змочують тверду поверхню (крайовий кут ($\theta > \pi/2$)), він вимірював висоту краплі z_e від вершини до екватора (рис. 1.4) і розраховував поверхневий натяг за формулою, яка добре працює лише для дуже широких (плоских) крапель:

$$\gamma = (\rho^\alpha - \rho^\beta) g z_e^2 / 2, \quad (1.16)$$

де $\rho^\alpha - \rho^\beta = \Delta\rho$ - різниця густин α і β фаз, z_e - віддаль від омбілічної точки краплі до найбільшого її діаметру. [7, 8]

Проте робота з великими краплями ускладнена, оскільки необхідно враховувати вплив неоднорідності твердої поверхні на формування краплі з постійним крайовим кутом вздовж лінії контакту фаз. Контактна лінія може відрізнитися від кола, що призводить до втрати обертової симетрії. Також важко точно визначити положення вершини широких крапель. Тому краще використовувати краплі менших розмірів. Вдосконалення методу дозволило зменшити мінімальний діаметр крапель до $2\xi e \approx 6$ (де ξe — безрозмірна величина),

що для води відповідає діаметру приблизно 1,5 см. [9]

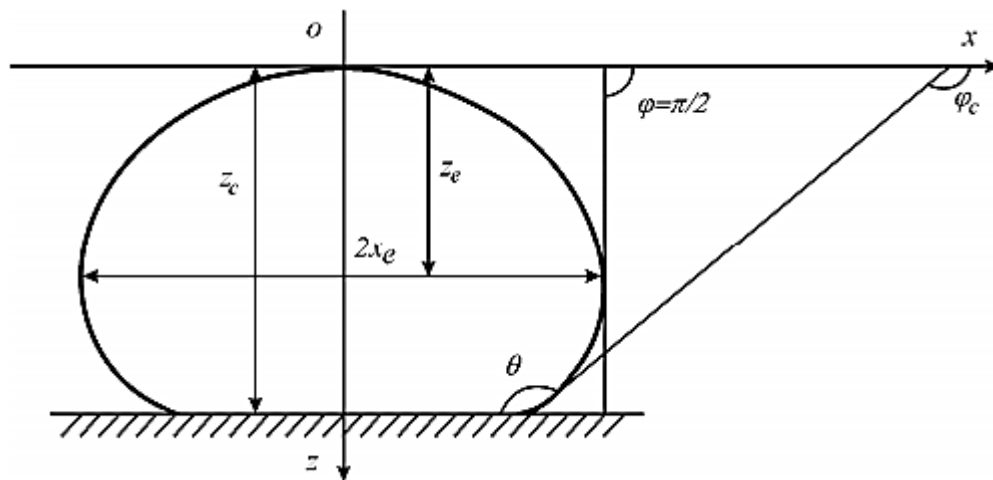


Рисунок 1.4 – Профіль лежачої краплі, рідина в якій не змочує тверду основу (підложку)

Розглянутий метод лежачої краплі, який використовує три параметри: x_e , z_e , $\varphi = \pi/2$, з яких вимірюються лише дві декартові координати, має суттєвий недолік, що призводить до значної похибки вимірювання x_e і z_e . Похибка фіксації положення екваторіальної точки значно впливає на похибку Δz_e більше, ніж на похибку Δx_e . [10]

В альтернативному варіанті методу лежачої краплі, що дозволив уникнути вимірювання z_e , було запропоновано вимірювати відстань $H_{\pi/4}$ від точки перетину осі z з дотичною до профілю краплі, що утворює з віссю z кут $\varphi = \pi/4$, до вершини краплі (рис. 1.5). Ця відстань пов'язана з координатами $x_{\pi/4}$ та $z_{\pi/4}$ простим співвідношенням [10]:

$$H_{\pi/4} = x_{\pi/4} - z_{\pi/4}. \quad (1.17)$$

Використовуючи таблиці Башфорта і Адамса [11], було отримано емпіричний вираз для розрахунку поверхневого натягу:

$$2/cx_e^2 = 0.0481q + 0.05200/q - 0.12268, \quad (1.18)$$

де $q \equiv H_{\pi/4}/x_e - 0.41421$; $c = 2/a^2$; $a^2 = 2\gamma/\Delta\rho g$ - капілярна стала. [10]

У дослідженні [12] можливості цього методу були розширені шляхом використання різних дотичних, проведених до профілю краплі, які утворюють з віссю x різні кути (на додаток до $\varphi = \pi/4$, використовувалися $\varphi = \pi/3$, $\varphi = 2\pi/3$, $\varphi = 3\pi/4$). У загальному випадку залежність між H_φ , x_φ , z_φ може бути виражена наступним

ЧИНОМ:

$$H_{\varphi} = \pm(x_{\varphi} \operatorname{tg} \varphi - z_{\varphi}), \quad (1.19)$$

де знак “+” відповідає кутам $\varphi < \pi/2$, а знак “-” — $\varphi > \pi/2$.

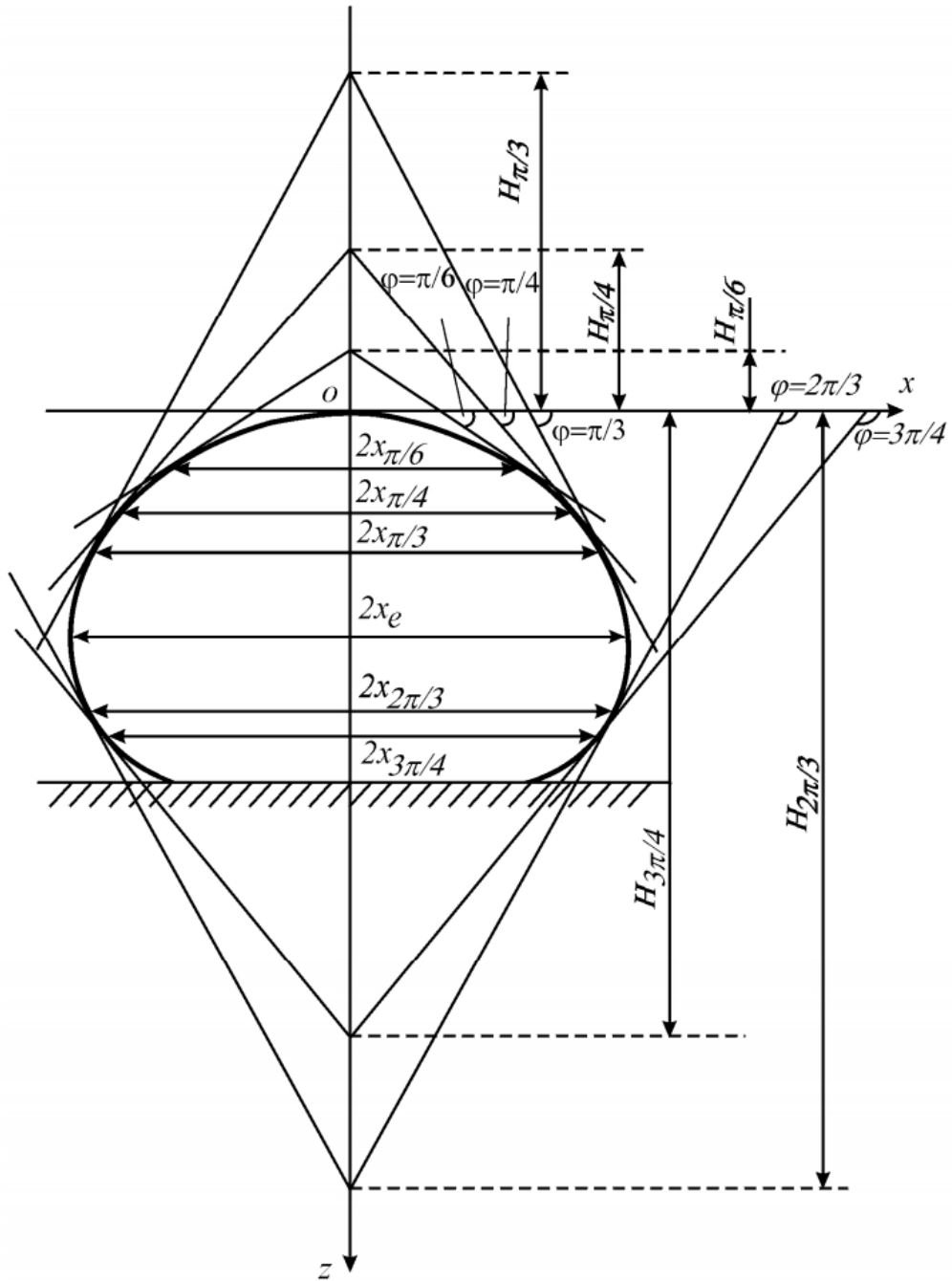


Рисунок 1.5 – Профіль лежачої краплі і величини, що вимірюються.

Розрахунок поверхневого натягу проводили з використанням табличних даних, отриманих на основі таблиць Башфорта і Адамса, які описують залежність H_{φ}/x_e від параметра β . Параметр $\beta = 2b^2/a^2$, де b — радіус кривизни поверхні в омбілічній точці, використовували для кожного з зазначених кутів. Спочатку шляхом інтерполяції визначали значення β з відповідної залежності. Потім, використовуючи таблиці, знаходили значення x_e/b , на основі якого обчислювали

радіус кривизни b . Нарешті, поверхневий натяг розраховували за допомогою формули [11]:

$$\gamma = (\rho^\alpha - \rho^\beta)gb^2/\beta. \quad (1.20)$$

Ще один варіант методу лежачої краплі передбачає вимірювання екваторіального діаметра $2x_e$ разом з діаметром $2x_{(m)}$ на відстані mx_e від вершини краплі, використовуючи значення $m=0,6$ або $m=1$. Умови, що характеризують цей варіант методу, виглядають наступним чином [Помилка! Джерело посилання не знайдено.]:

$$\varphi \Big|_{x=x_e} = p/2; \quad z \Big|_{x=x_{(m)}} = mx_e. \quad (1.21)$$

Вищеописані методи лежачої краплі використовують координати, пов'язані з екваторіальною точкою профілю краплі, де $\varphi=\pi/2$. У випадках, коли крапля не змочує поверхню, існує точка, яка легко ідентифікується експериментально. Це точка контакту трьох фаз, де $\varphi_c=\theta=\pi$. [13]

Якщо виникають труднощі з отриманням інформації про крайовий кут, то пропонується формувати на одній і тій же поверхні декількох крапель, які відрізняються об'ємом, але мають однаковий крайовий кут $\varphi_c=\theta$ (величина якого невідома). Вимірюють чотири параметри: $2x_{e1}$, $2x_{e2}$, z_{c1} , z_{c2} . На основі цих даних розраховують поверхневий натяг і крайовий кут змочування.

Метод висячої краплі вперше був розроблений Андреасом, Хаусером та Такером. Використовували висячі краплі, на профілі яких вимірювали екваторіальний діаметр $2x_e$ та діаметр $2x_{(m)}$ на відстані mx_e ($m=2$) від вершини краплі. Поверхневий натяг γ розраховували з таблиць залежності $1/4cxe^2$ від $x_{(m)}/x_e$. Ця залежність була отримана експериментально, шляхом вимірювання діаметрів $2x_e$ та $2x_{(m)}$ для крапель води різного розміру та форми. При цьому значення $x_{(m)}/x_e$ змінювалося від 0.7 до 1.00 [14].

Ще один варіант методу висячої краплі використовує краплю з "шийкою", і вимірюють екваторіальний діаметр краплі $2x_e$ та діаметр "шийки" $2x_n$ (рис. 1.6).

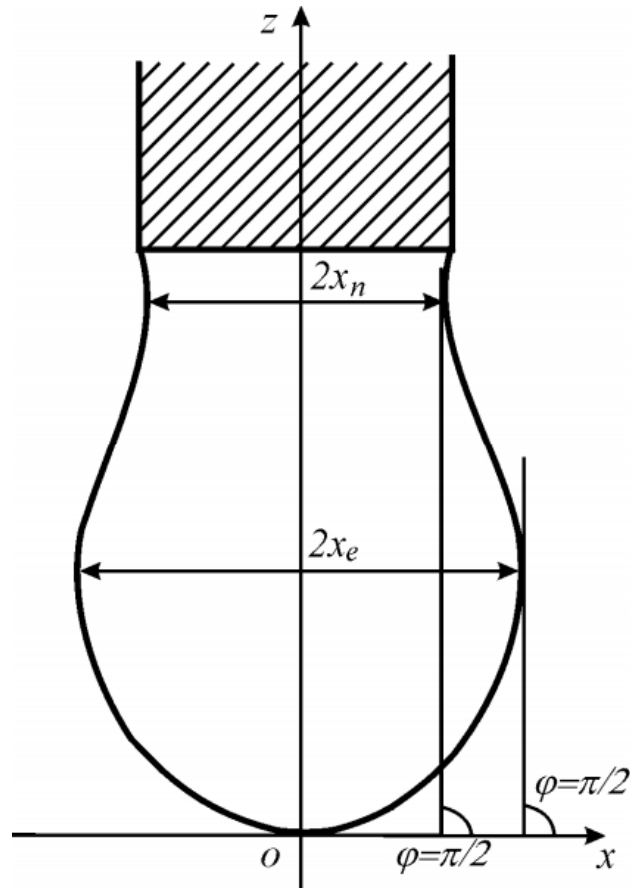


Рисунок 1.6 – Профіль висячої краплі з шийкою при вимірюванні поверхневого натягу.

Методика визначення поверхневого натягу γ за значеннями $2x_e$ та $2x_n$ аналогічна описаній, така: спочатку обчислюють відношення вимірних діаметрів, а потім, використовуючи залежність, що зв'язує це відношення з безрозмірним екваторіальним діаметром, визначають параметр s , а потім і γ [14].

В іншій методиці визначають дві пари декартових координат будь-яких двох точок 1 і 2: x_1, z_1, x_2, z_2 (рис. 1.7) [15].

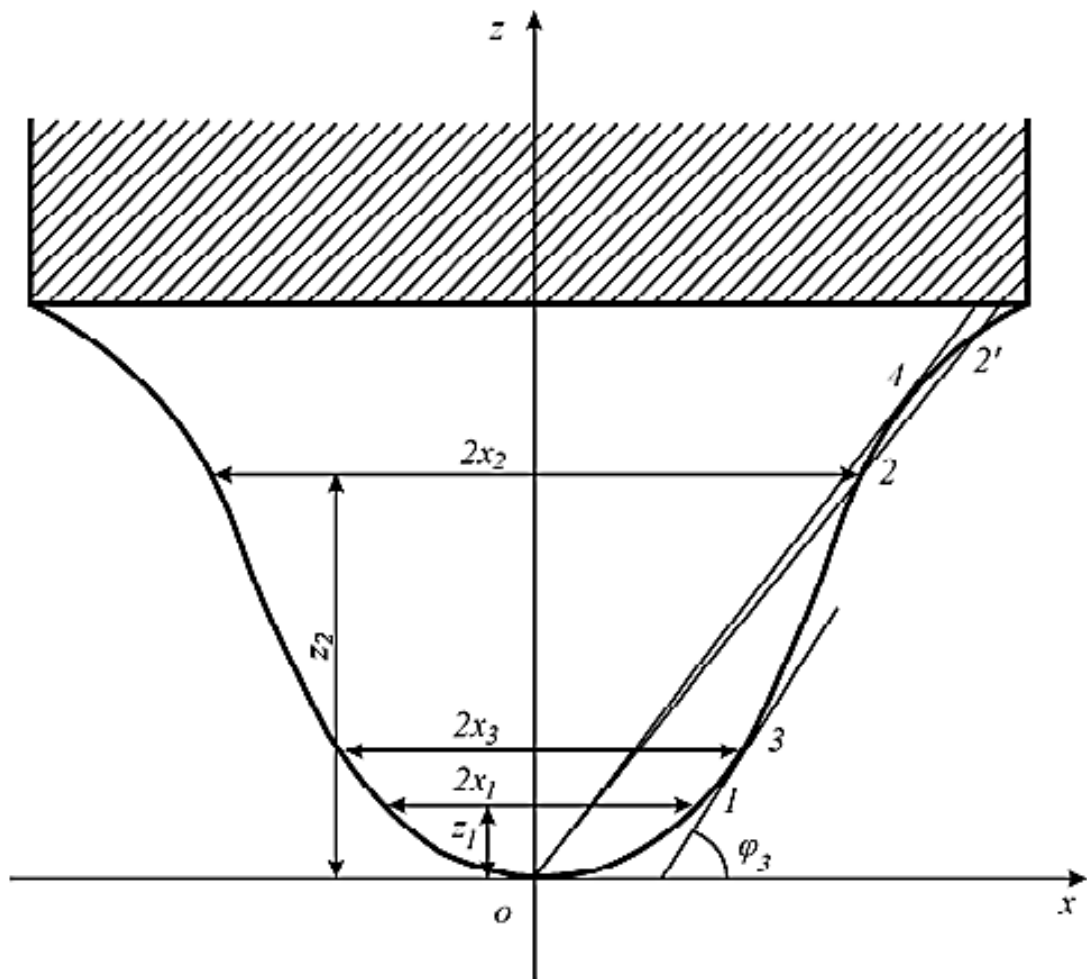


Рисунок 1.7 – Профіль висячої краплі при вимірюванні поверхневого натягу.

Описані методи лежачої та висячої краплі спрямовані на мінімізацію кількості вимірюваних величин, щоб, використовуючи додаткові крайові умови, однозначно визначити капілярну сталу a^2 , а отже, і поверхневий натяг γ . Схема пошуку a^2 (і γ) полягає в наступному: на реальному профілі меніска вибирають дві точки (або одна з відомим кутом нахилу дотичної), через які проводиться теоретичний профіль, що описується двома параметрами: b та a^2 . Необхідно знайти значення другого параметра. При цьому знання всього профілю $z(x)$ є надлишковим.

Методи висячої та лежачої крапель схожі, незважаючи на відмінності у способах формування краплі, основні зусилля зосереджені на отриманні якісного зображення краплі та вимірюванні координат точок її профілю [16].

1.3 Аналіз приладів для контролю поверхневого натягу

Прилад для вимірювання поверхневого натягу зазвичай називається тензіометром. У тензіометрі Дю Нуї, названому на честь французького біофізика П'єра Леконта Дю Нуї, вимірювання поверхневого натягу здійснюється за допомогою дротяного кільця (метод відриву кільця). Вимірюється сила, необхідна для відриву кільця від поверхні розділу "рідина-повітря". Сила відриву вимірюється в умовних одиницях, а потім обчислюється значення поверхневого натягу в міліньютонках на метр (мН/м).

Тензіометри фірми KRUSS є сучасним приладами для визначення поверхневого натягу рідин. Простота в користуванні та елегантний дизайн є характерними рисами цих приладів. Тензіометри фірми KRUSS використовують в наукових дослідженнях в хімічній промисловості та випробувальних лабораторіях для вивчення ефективності миючих засобів, поверхнево-активних речовин і емульгаторів. [17].

Вимірювання поверхневого натягу за тензіометром К6 (рис. 1.8) базується на методі відриву кільця (метод Дю Нуї). Перевагами цього методу є швидкість вимірювання та невелика кількість зразка, необхідна для аналізу.

Тензіометр К6 має такі особливості:

- діапазон вимірювання: 0 ... 90 мН / м;
- платиноіридієве кільце (довжина кола 6 см);
- ємність для зразка.



Рисунок 1.8 – Тензіометр К6 заснований на методі відриву кільця (метод Дю Нуї)

Тензіометр серії K20 має компактний дизайн, займає мало місця на робочому столі. Захисний екран захищає вимірювальний елемент і систему ваги від повітряних потоків, які можуть виникнути в результаті дихання або гучної розмови, просадки і призвести до неправильних результатів. Вимірювання відображаються на дисплеї пристрою та можуть бути надруковані або збережені на комп'ютері (за допомогою LabDesk) (рис 1.9). Тензіометри серії K20 мають два різновиди: - цифровий тензіометр K20S і K2.

Обидві моделі працюють за методом пластини і кільця, але завдяки сервоприладу метод пластини K20 працює в напівавтоматичному режимі. Крім того модель K20S дозволяє визначити максимальну силу тільки в момент натягу тонкої плівки, але не може зафіксувати силу в момент розриву плівки. В даних тензіометрах є можливість збереження даних в пам'яті приладу, розрахунок статистичних даних по декількох вимірюваннях (при значному неспівпадінні результатів прилад просить переробити експеримент). Наявність сервоприводу дозволяє запрограмувати глибину погруження вимірювального елемента, що зручно для вимірювання поверхневого натягу. Вимірювання поверхневого натягу можна проводити при кімнатній температурі, або в діапазоні від 10 до 100 °C.



Рисунок 1.9 – Автоматичний тензіометр K20 для визначення міжфазного натягу

Тензіометр DCAT15 Data Physics Tenzimeters серії DCAT, призначений для гравітаційних вимірювань поверхневого натягу, а також вологості твердих тіл, порошків та окремих волокон (рис 1.10). Програма автоматично розраховує та графічно відображає результати [18]. Сфери застосування:

- характеристики ПАР методом Ленгмюра;
- розробка косметичних засобів;
- лаків, клеї та покриття в автомобільній промисловості;
- визначення змочування порошків;
- контроль функціональних покриттів;
- аналіз масел і мастильних матеріалів.

В даному приладі використовуються такі методи аналізу, як метод дю Нуї, метод Вільгельмі, метод Васбурна, метод визначення щільності рідин, метод плівки Ленгмюра, метод визначення сили проникнення, визначення щільності, адсорбція.

Модулі програмного забезпечення:

- DCATS 31: вимірювання поверхневого натягу за методом Вільгельмі і по методу дю Нуї.

- DCATS 32: визначення динамічного крайового кута змочування, адсорбції рідини порошками або пучками волокон з наступним розрахунком середнього значення крайового кута по методу Васбурна, розрахунок вільної поверхневої

енергії і її складових.

- DCATS 33: автоматичне визначення критичної концентрації утворення ПАР.
- DCATS 34: визначення густини рідин.
- DCATS 35: визначення сили пенетрації.
- DCATS 36: визначення густини твердих тіл.
- DCATS 37: визначення адгезії рідин і твердих поверхонь.
- DCATS 38: аналіз багато молекулярних плівок методом Ленгмюра.

Особливості моделі DCAT15:

- повністю автоматичний універсальний тензіометр;
- калібрування здійснюється автоматично за допомогою вбудованих навантажень або вручну;
- положення ємності зі зразком регулюється автоматично через програмне забезпечення;
- можливість підключення двох температурних датчиків;
- система захисту від зіткнення кільця з дном резервуара зі зразком;
- ідеально відповідає вимогам роботи з поверхнево-активними речовинами.

Прилад дозволяє вимірювати наступні параметри:

- поверхневий натяг рідин;
- динамічний кут змочування;
- щільність рідин;
- осад/проникнення;
- щільність твердих тіл.



Рисунок 1.10 – Тензіометр DCAT15

Висновки до розділу

Для дослідження методів контролю поверхневого натягу рідин меніска біля вертикальної стінки і двох менісків з метою виявлення оптимальної кількості параметрів, що вимірюють при визначенні поверхневого натягу рідин необхідно:

- 1) дослідити метод меніска біля вертикальної стінки, визначити параметри, які необхідно вимірювати для контролю поверхневого натягу рідин;
- 2) дослідити метод двох менісків, визначити параметри, які необхідно вимірювати для контролю поверхневого натягу рідин;
- 3) розробити функціональні схеми приладів, які реалізують досліджені методи;
- 4) зробити метрологічний аналіз досліджених методів і приладів контролю поверхневого натягу рідин.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДИК КОНТРОЛЮ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИН

2.1 Метод меніска біля плоскої стінки

В даному методі використовують меніск біля достатньо довгої вертикальної стінки, який можна розглядати як циліндричний розгорнутий меніск (рис. 2.1). Це дає можливість застосовувати для розрахунків поверхневого натягу прості, але разом з тим строгі аналітичні співвідношення. Поверхня розгорнутих менісків не перетинає осі обертання. Крім того, розгорнуті меніски існують тільки в контакті з протяжною частиною фази α (що утворює меніск), поверхня якої горизонтальна (поверхня меніска асимптотично переходить в цю горизонтальну поверхню).

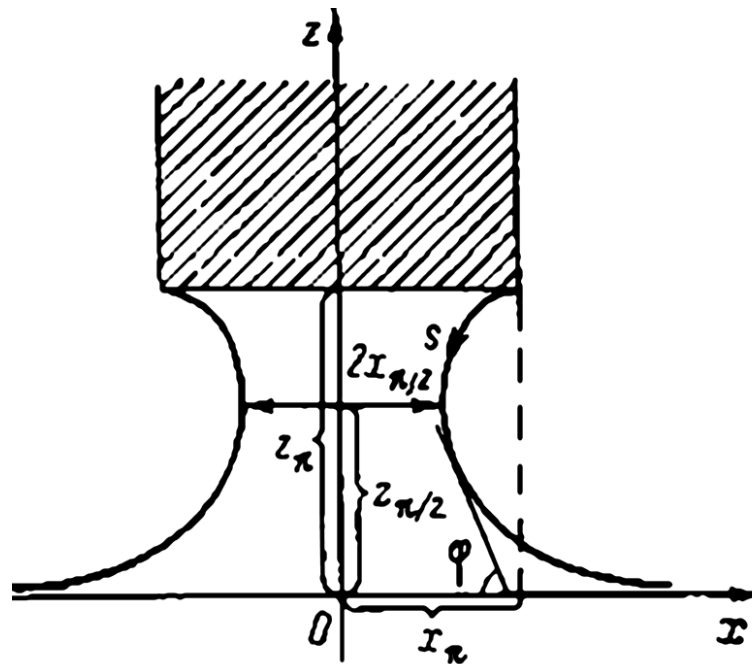


Рисунок 2.1 – Профіль циліндричного рідкого розгорнутого меніска, що торкається під нульовим кутом горизонтальної твердої поверхні.

Найпростішими диференціальними співвідношеннями для профілів розгорнутих менісків, що зв'язують змінні x , z , s і φ будуть

$$dz/ds = -\sin \varphi. \quad (2.1)$$

Для меридіональної кривизни тоді справедливі вирази

$$c_1 = d\varphi/ds = d \sin\varphi/dx, \quad (2.2)$$

$$c_1 = d \cos \varphi / dz. \quad (2.3)$$

Запишемо формулу Лапласа:

$$p^\alpha - p^\beta = \gamma(c_1 + c_2). \quad (2.4)$$

Згідно умови механічної рівноваги, тиски у фазах α і β змінюються з висотою h згідно формули

$$dp/dh = -\rho g. \quad (2.5)$$

Якщо густину вважати сталою, тоді отримаємо

$$p = p_0 - \rho g h, \quad (2.6)$$

де індекс 0 відноситься до рівня, від якого відраховують висоту h .

З врахуванням (2.6) ліву частину (2.4) можна переписати так:

$$p^\alpha - p^\beta = p_0^\alpha - p_0^\beta - (\rho^\alpha - \rho^\beta) g h, \quad (2.7)$$

а рівняння Лапласа представити у вигляді відношення

$$c_1 + c_2 = (p_0^\alpha - p_0^\beta) / \gamma - (\rho^\alpha - \rho^\beta) g h / \gamma. \quad (2.8)$$

Оскільки тиски в співіснуючих фазах α і β на рівні $z=0$ рівні ($p_0^\alpha = p_0^\beta$), формула Лапласа (2.8) прийме більш простий вид

$$c_1 + c_2 = \pm [(\rho^\alpha - \rho^\beta) g / \gamma] z, \quad (2.9)$$

де знак «плюс» відноситься до газового, а «мінус» - до рідкого меніску (вісь z в першому випадку збігається з напрямком гравітаційного поля, а в другому - протилежна йому, див. рис. 1.1). Фактично права частина (2.9) завжди негативна, так як для газового меніска $\rho^\alpha < \rho^\beta$.

Запишемо вираз для азимутальної кривизни

$$c_2 = \sin \varphi / x. \quad (2.10)$$

Циліндричні меніски характеризуються нульовою азимутальною кривизною

$$c_2 = \sin \varphi / x = 0. \quad (2.11)$$

Запишемо вираз для капілярної сталої

$$c = | \rho^\alpha - \rho^\beta | g / \gamma. \quad (2.12)$$

З врахуванням (2.10), (2.11), (2.12), (2.2) і (2.3) більш детальними формами рівняння (2.12), що описує меридіан розгорнутого меніска, будуть

$$d\varphi/ds = -cz, \quad (2.13)$$

$$d \sin \varphi / dx = -cz, \quad (2.14)$$

$$d \cos \varphi / dz = -cz. \quad (2.15)$$

Рішення цих диференціальних рівнянь (або їх систем) є аналітичними

виразами, що містять лише елементарні функції.

Інтегрування (2.15) з урахуванням умови $\varphi = 0$ при $z = 0$ дає

$$\cos \varphi = 1 - cz^2/2 \quad (2.16)$$

або

$$z = 2 \sin (\varphi/2)/\sqrt{c}. \quad (2.17)$$

Підстановка (2.17) в (2.13) і (2.14) з подальшим інтегруванням призводить до залежностей s і x від φ :

$$s = \ln \operatorname{ctg}(\varphi/4)/\sqrt{c} + C, \quad (2.18)$$

$$x = [\ln \operatorname{ctg} (\varphi/4) - 2 \cos (\varphi/2)]/\sqrt{c} + C, \quad (2.19)$$

а підстановка (2.17) в (2.19) дає залежність x від z

$$x = (\ln [(2 + \sqrt{(4 - z^2c)})/z \sqrt{c}] - \sqrt{(4 - z^2c)})/\sqrt{c} + C, \quad (2.20)$$

де C - константа інтегрування

З виразів (2.19) і (2.20) видно, що сімейство профілів циліндричних розгорнутих менісків є сукупність профілів тільки однієї форми, зсунутих по осі x .

Для визначення C , очевидно, не можна скористатися крайовими умовами

$$\varphi = 0, z = 0, s = \infty, x = \infty, \quad (2.21)$$

але можна ввести практично зручні значення змінних s , x , z в точках профілю, де $\varphi = \pi$ або $\varphi = \pi/2$, наприклад в місці торкання профілю під нульовим кутом горизонтальної твердої поверхні або в найбільш вузькому місці («шийці») меніска (рис. 1.2). Тоді (2.18) – (2.20) можна переписати в наступному вигляді

$$s = s_\pi + \ln \operatorname{ctg}(\varphi/4)/\sqrt{c}, \quad (2.22)$$

$$s = s_{\pi/2} + [\ln (\sqrt{2}-1) + \ln \operatorname{ctg}(\varphi/4)]/\sqrt{c}, \quad (2.23)$$

$$x = x_\pi + [\ln \operatorname{ctg}(\varphi/4) - 2 \cos(\varphi/2)]/\sqrt{c}, \quad (2.24)$$

$$x = x_{\pi/2} + [\sqrt{2} + \ln(\sqrt{2}-1) - 2 \cos(\varphi/2) + \ln \operatorname{ctg}(\varphi/4)]/\sqrt{c}, \quad (2.25)$$

$$x = x_\varphi + \{ \ln [z_\varphi(2 + \sqrt{(4 - z_\varphi^2c)})/z(2 + \sqrt{(4 - z_\varphi^2c)})] + \sqrt{(4 - z_\varphi^2c)} - \sqrt{(4 - z^2c)} \} / \sqrt{c}. \quad (2.26)$$

де індекси φ і $\varphi/2$ говорять про приналежність величин до точок з $\varphi = \pi$ і $\varphi = \pi/2$, індекс φ означає або π , або $\pi/2$

Найпростіший варіант методу меніска біля плоскої стінки полягає у вимірюванні висоти z_c утвореної біля вертикальної стінки меніска, тобто різниці рівнів рідини вдалині від стінки і на лінії трифазного контакту (рис, 2.2), і розрахунку при відомому крайовому куті змочування $\theta = \pi/2 - \varphi_c$ поверхневого натягу за формулою

$$\gamma = (\rho^a - \rho^b) g z^2 / 2 (1 - \sin \theta), \quad (2.27)$$

впливає з урахуванням (2.12) з (2.16). В окремому випадку, при повному змочуванні ($\theta = 0$), розрахункова формула має вигляд

$$\gamma = (\rho^a - \rho^b) g z^2 / 2. \quad (2.28)$$

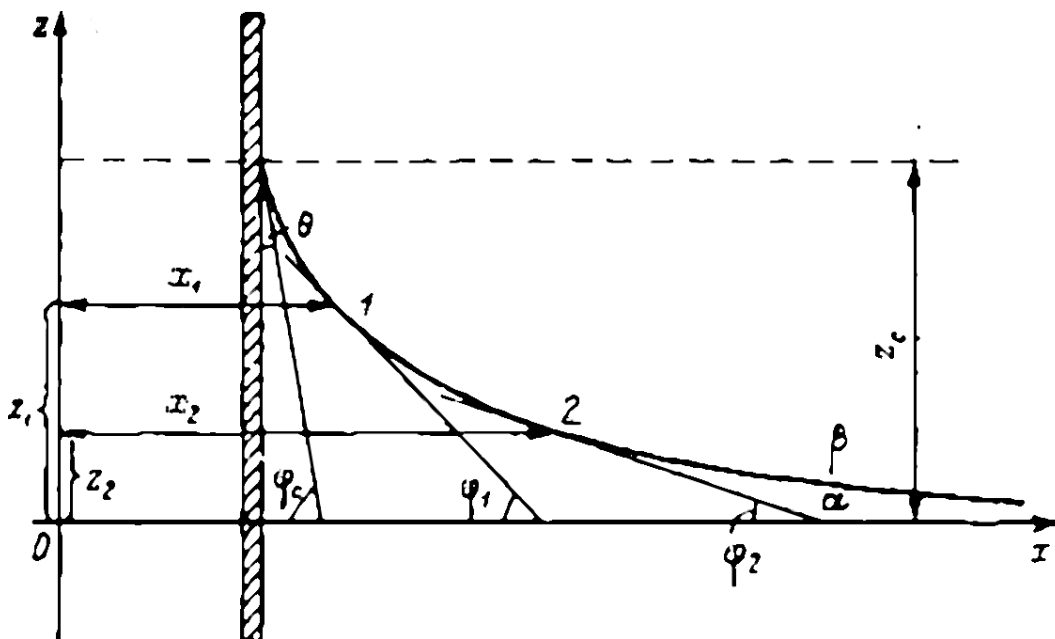


Рисунок 2.2 – Профіль меніска біля вертикальної плоскої стінки

Загалом, цей варіант методу може бути реалізований і для похилої стінки, тільки в цьому випадку замість кута θ у формулі (2.27) необхідно вже використовувати кут $\theta \pm \alpha$, де α -кут відхилення площини стінки від вертикалі (знак “мінус” буде відповідати нахилу стінки в сторону меніска, а знак “плюс” - нахилу в протилежну сторону).

Можливий інший варіант методу, в основі якого лежить аналіз форми профілю меніска на деякому віддаленні від стінки, що виражається у вимірі координат φ і z або, φ і x двох довільно вибраних точок профілю (точки 1 і 2 на рис. 2.2). Використання двох точок дозволяє, очевидно, уникнути вимірювання абсолютних значень декартових координат z_1 z_2 або x_1 , x_2 і достатньо визначити в експерименті лише їх різниці: $\Delta z = z_1 - z_2$ або $\Delta x = x_2 - x_1$. Таким чином, співвідношення капілярної постійної і вимірюваними величинами, що впливають відповідно з (2.17) і (2.19), мають вигляд

$$\Delta z = 2 [\sin (\varphi_1 / 2) - \sin (\varphi_2 / 2)] / \sqrt{c} \quad (2.29)$$

$$\Delta x = (2 [\cos (\varphi_1 / 2) - \cos (\varphi_2 / 2)] + \ln [\operatorname{tg} (\varphi_1 / 4) \operatorname{tg} (\varphi_2 / 4)]) / \sqrt{c}. \quad (2.30)$$

Кути φ_1 і φ_2 можна визначати наступним способом - шляхом вимірювання

кутів між падаючими і відбитими від меніска променями світла, що виходять від двох лазерів. Замість двох лазерів можна використовувати один лазер, промінь від якого спрямований на меніск вертикально вниз. Рух променя по поверхні меніска здійснюється переміщенням останнього в строго горизонтальному напрямку, тобто вздовж осі x (рис. 2.3).

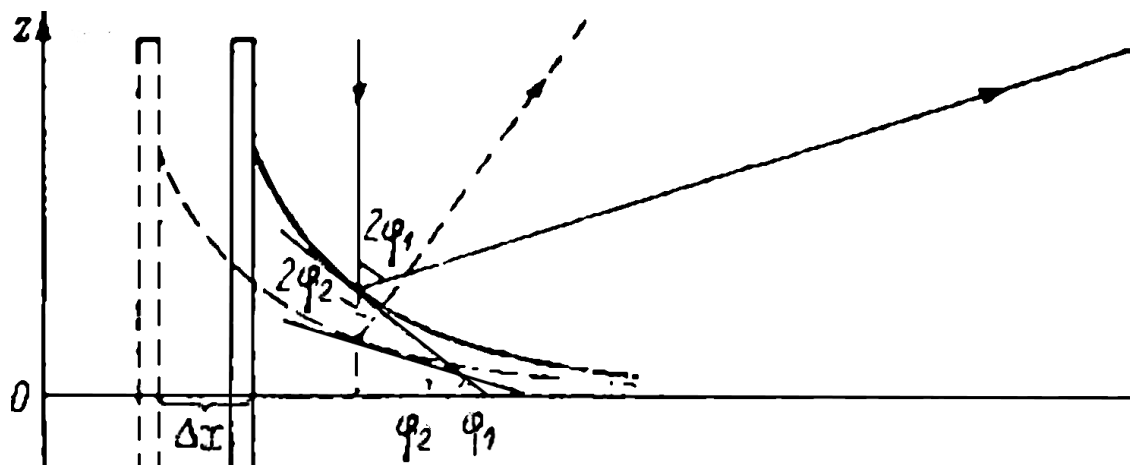


Рисунок 2.3 - Відбиття променя лазера від меніска у плоскій стінці

Замість горизонтального зміщення профілю меніска Δx можна вимірювати зміщення по вертикалі Δz . Схема відображення світлового променя, генерованого горизонтально розташованим лазером, від поверхні меніска в різних його положеннях представлена на рис. 2.4. В даному випадку вимірюваними кутами є кути ψ_1 і ψ_2 , які пов'язані з шуканими φ_1 і φ_2 співвідношеннями

$$\varphi_1 = \pi/2 - \psi_1/2, \quad \varphi_2 = \pi/2 - \psi_2/2. \quad (2.31)$$

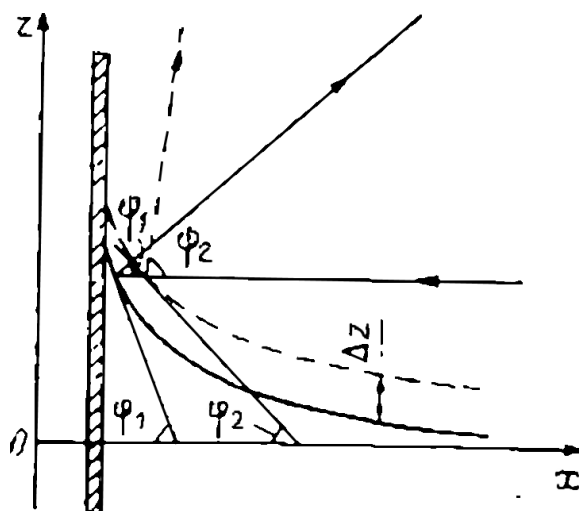
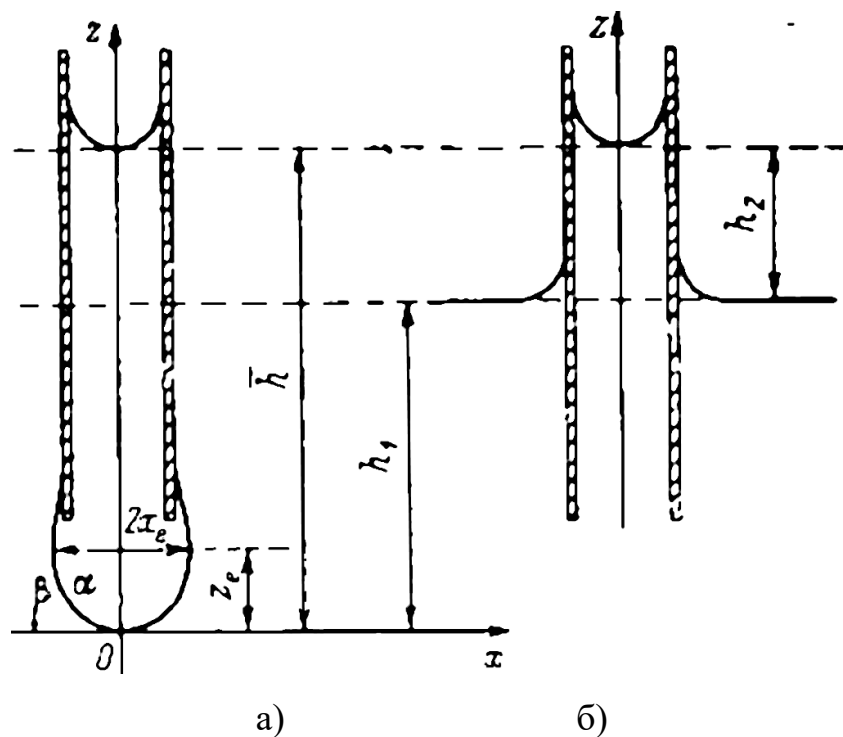


Рисунок 2.4 - Відображення горизонтально направлено променя лазера від меніска біля плоскої стінки

Для спрощення процедури вимірювання можна використати прийом закріплення кутів ψ_1 і ψ_2 , наприклад 50° і 90° (кути φ_1 і φ_2 рівні 65° і 45°).

2.2 Метод двох менісків

Суть методу двох менісків полягає в наступному. На кінці тонкостінної капілярної трубки формують висячу краплю з екватором. При цьому в самій трубці утворюється стовп рідини з меніском, поверхня якого є поверхня підгорнутої бульбашки (рис. 2.5, а). Після цього вимірюють вертикальну відстань h між вершинами обох менісків (краплі і бульбашки) і екваторіальний діаметр краплі $2x_e$. Потім (другий етап) трубку занурюють в широку посудину з тієї ж рідиною (рис. 2.5, б) і вимірюють висоту капілярного підняття h_2 після чого знаходять різницю $h_1 = h - h_2$. Очевидно, на рівні $z = h_1$ тиск в рідкій фазі а дорівнює атмосферному ($p^a = p^b$), а сама висота h_1 відповідає різниці тисків $p_0^a - p_0^b$ в вершині краплі. Величини h_1 і x_e служать тими вихідними даними, на підставі яких в кінцевому рахунку розраховують поверхневий натяг.



а – перша стадія, б – друга стадія

Рисунок 2.5 - Профілі менісків і вимірювані величини в методі двох менісків

В основі розрахунку поверхневого натягу лежить рівняння балансу сил, що діють на сегмент висячої краплі нижче екватора: сили поверхневого натягу γ (спрямованої вгору), сили надлишкового тиску $p^a - p^b$ з боку рідини вище екватора і ваги сегмента (обидві сили спрямовані вниз). У наближенні кульового сегмента це

рівняння балансу сил має вигляд

$$2\pi x_e \gamma = \pi x_e^2 (h_1 - x_e)(\rho^a - \rho^b)g + 2\pi x_e^3 (\rho^a - \rho^b)g/3, \quad (2.32)$$

звідки, з урахуванням (2.12), впливає вираз для капілярної постійної

$$2/c = x_e h_1 - x_e^2/3, \quad (2.33)$$

Якщо припускати, що профіль висячої краплі нижче екватора є напівеліпс з великою z_e і малою піввісю x_e . У цьому наближенні рівняння балансу можна записати так:

$$2\pi x_e \gamma = \pi x_e^2 (h_1 - z_e)(\rho^a - \rho^b)g + 2\pi x_e^2 z_e (\rho^a - \rho^b)g/3. \quad (2.34)$$

З огляду на вираз для радіуса кривизни в вершині краплі (нижній точці еліпса)

$$b = x_e^2 / z_e, \quad (2.35)$$

а також співвідношення (2.12),

$$(p^a - p^b)/\gamma = 2/b, \quad (2.36)$$

з (2.34) отримаємо

$$(2/c)^2 - x_e h_1 (2/c) + x_e^3 h_1/3 = 0. \quad (2.37)$$

Розв'язок рівняння (2.37) відносно $2/c$ дає наступну формулу:

$$2/c = x_e h_1 (1 + \sqrt{(1 - 4x_e/3h_1)})/2 \quad (2.38)$$

Метод двох менісків є альтернативою методу капілярного підняття. Цей метод не вимагає враховування умов змочування стінок трубки (як зовнішніх, так і внутрішніх); крім того, в ньому не вимагає знання внутрішнього радіуса трубки. Очевидно, що в цей метод має певні переваги.

Висновки до розділу

Згідно виконаних теоретичних досліджень можна зробити наступні висновки:

а) запропоновано визначати поверхневий натяг на основі вимірювання висоти меніска і кута змочування в точці трифазного контакту методом меніска біля вертикальної стінки;

б) запропоновано визначати поверхневий натяг на основі вимірювання горизонтальної відстані між двома точками меніска і кутів нахилу меніска біля вертикальної стінки;

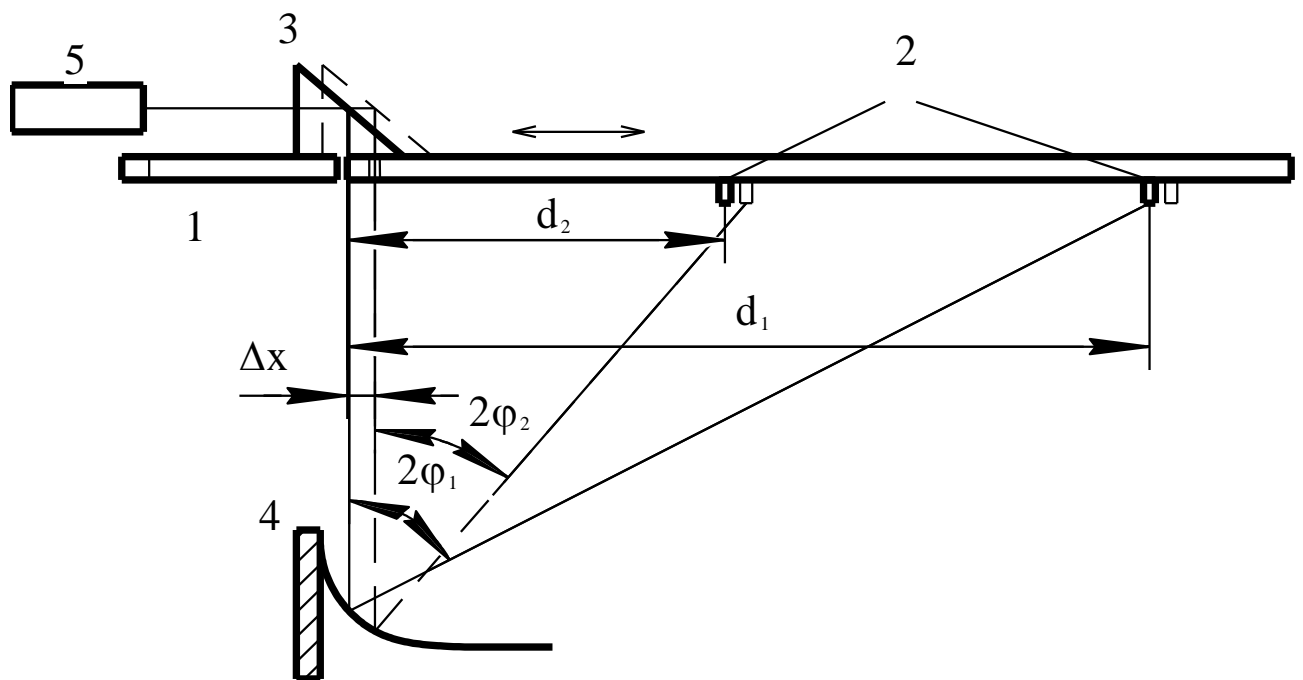
в) запропоновано визначати поверхневий натяг на основі вимірювання вертикальної відстані між двома точками меніска і кутів нахилу меніска методом меніска біля вертикальної стінки;

г) запропоновано визначати поверхневий натяг на основі вимірювання відстані між двома менісками і радіусу нижнього меніска методом двох менісків.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПРИЛАДІВ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИН

3.1 Розроблення функціональної схеми приладу контролю поверхневого натягу рідин з горизонтальним зміщенням променя лазера

Схема установки показана на рис. 3.1. Установка складається з екрану 1, фотоопорів 2; поворотної призми 3; пластинки 4, лазера 5. В ній за рахунок застосування фотоопорів заздалегідь вибрані місця падіння світлового променя на екран (два положення), що дозволяє працювати з незмінними відстанями d_1 і d_2 .



1 - екран; 2 - фотоопір; 3 - поворотна призма; 4 - пластинка з меніском 5 - лазер

Рисунок 3.1 - Схема установки зі зміщенням променя в горизонтальному напрямі

Послідовність операцій при роботі на ній наступна. Спочатку переміщенням екрану 1, на якому встановлені поворотна призма 3 і два диференціальних фотоопори 2 (включених в електричну мостову схему), щодо нерухомого меніска підбирається такий стан екрану, щоб відбитий від меніска промінь потрапляв на один з фотоопорів. Точне місце попадання променя на фотоопір визначається за мінімальним розбалансуванням моста. Потім екран зсувається в потрібний бік до

тих пір, поки промінь не потрапляє на інший фотоопір, після чого вимірюється відстань Δx .

Кути φ_1 і φ_2 можна виразити через інші величини:

$$\varphi_1 = \arctg (d_1/H)/2, \quad \varphi_2 = \arctg (d_2/H)/2, \quad (3.1)$$

де H — висота від горизонтальної ділянки рідини до екрану.

Якщо вертикальні відстані від точок на поверхні меніска до екрану вважати однаковими і рівними фіксованій відстані від горизонтальної поверхні рідини в кюветі до екрану H , то це дозволить, в силу співвідношень (3.1), вважати і кути φ_1 і φ_2 незмінними в ході досліду. Що в свою чергу, дозволяє вважати весь вираз в дужках у формулі (2.30) розглядати як константу приладу. У такому випадку розрахункова формула матиме такий вигляд:

$$\gamma = K (\rho^a - \rho^b) (\Delta x)^2, \quad (3.2)$$

де K -константа приладу, що включає також гравітаційне прискорення g , яка, в принципі, може бути визначена за відомими значеннями ρ^a , ρ^b і γ для деякої еталонної системи рідина – газ.

Для точніших розрахунків пропонується розглядати величину K як деяку функцію $(\rho^a - \rho^b) (\Delta x)^2$, а саме:

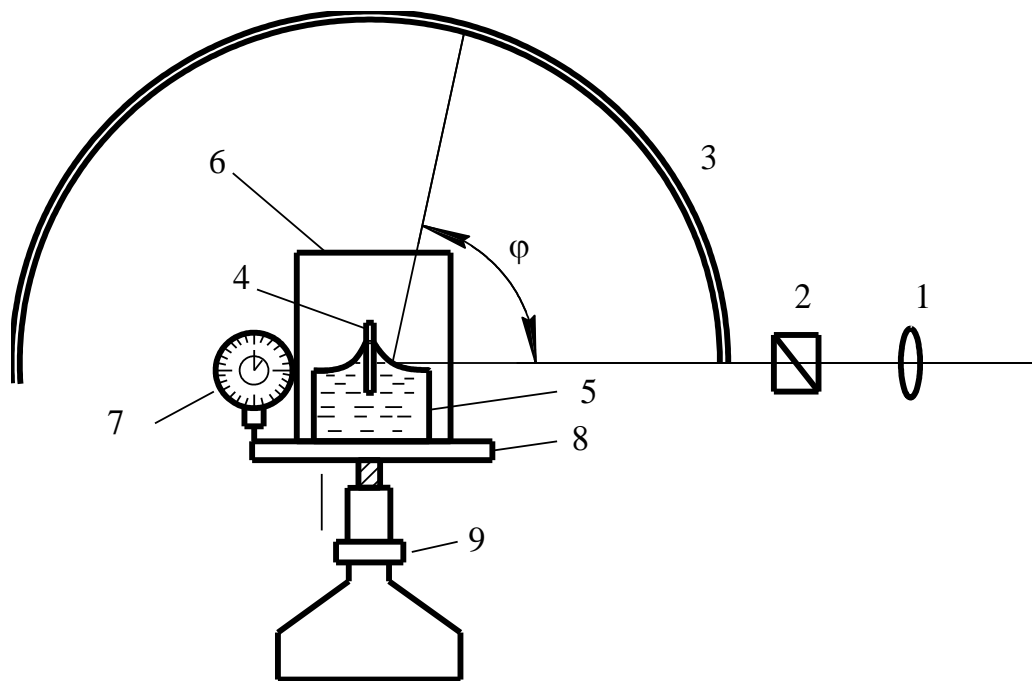
$$K = K_1 / ((\rho^a - \rho^b) (\Delta x)^2 + K_2), \quad (3.3)$$

де K_1 і K_2 - приладові константи, які визначаються за двома системами рідина - газ з відомими значеннями ρ^a , ρ^b і γ . Тоді вираз (3.2) переписеться так:

$$\gamma = \frac{K_1 (\rho^a - \rho^b) \Delta x^2}{(\rho^a - \rho^b) \Delta x^2 + K_2}. \quad (3.4)$$

3.2 Розроблення функціональної схеми приладу контролю поверхневого натягу рідин з вертикальним зміщенням променя лазера

Схема установки показана на рис. 3.2. Установка складається з лінзи 1, призми 2, екрана 3 зі шкалою, пластинки 4, кювети 5, прозорого футляра 6, мікрометра 7, підйомного столика 8, регульовального гвинта 9.



1 – лінза, 2 — призма, 3 – екран зі шкалою, 4 – пластинка, 5 – кювета, 6 – прозорий футляр, 7 – мікрометр, 8 – підйомний столик, 9 – гвинт регулювальний

Рисунок 3.2 – Схема установки зі зміщенням променя у вертикальному напрямі

Для спрощення процедури вимірювання кутів φ_1 і φ_2 приймають сталими. Це здійснюється вибором таких положень меніска, щоб вимірювані в досліді кути ψ_1 і ψ_2 були рівні 50° і 90° (кути φ_1 і φ_2 рівні 65° і 45°). Застосування в установці вигнутого по колу екрана зі шкалою в градусах робить фіксацію кутів порівняно простим завданням. При цьому, відстань від меніска до екрану має бути досить великою, щоб знехтувати відхиленням (уздовж осі абсцис) точок 1 і 2 профілю меніска від центру утвореної екраном окружності. В іншому випадку покази на шкалі екрана не відповідатимуть справжнім значенням кутів ψ_1 і ψ_2 . Закріплюючи кути φ_1 і φ_2 і приймаючи постійну величину в квадратних дужках в (2.29), можна використовувати наступну розрахункову формулу:

$$\gamma = K(\rho^a - \rho^b) (\Delta z)^2, \quad (3.5)$$

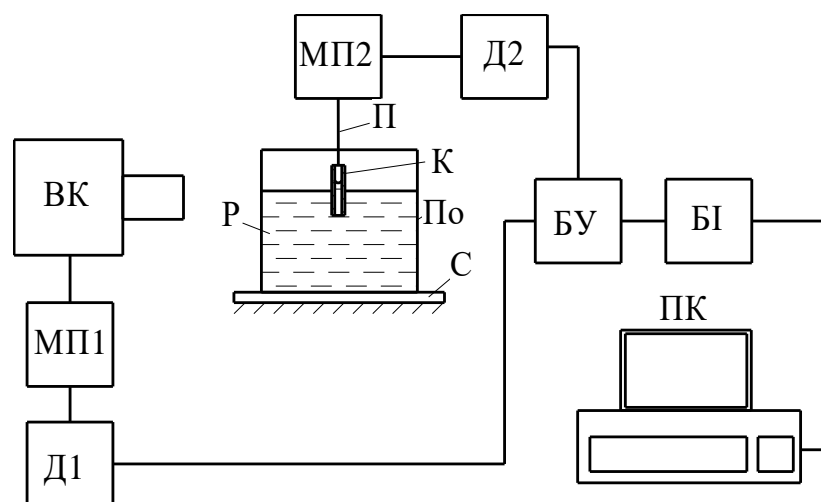
де K - константа приладу (що включає гравітаційне прискорення g), яка може бути або обчислена, або визначена за допомогою рідини з відомими властивостями.

Експериментальна установка має свої особливості, головним чином стосуються вимірювальної кювети 5. Оскільки, на відміну від розглянутої в попередньому розділі установки, тут має місце горизонтальна орієнтація падаючого на меніск променя, то виникає проблема уникнення утворення меніска

рідини під стінами кювети, що перешкоджало б попаданню променя на досліджуваний меніск. Для цієї мети використовують досить широка кювету, яка має гострі краї і виготовляється з незмочуваного матеріалу. Крім того кількість наливої в кювету рідини береться такою, щоб поверхня рідини була на одному рівні з краями кювети.

3.3 Розроблення функціональної схеми приладу контролю поверхневого натягу рідин методом двох менісків

Прилад для вимірювання поверхневого натягу рідин методом двох менісків складається з: відеокамери ВК, капіляра К, посудини По, підвісу капіляра П, механізму переміщення відеокамери МП1 і механізму переміщення капіляра МП2, серводвигунів з вбудованими датчиками положення Д1 і Д2, блоку управління БУ, блоку інтерфесів БІ, масивного стола С і персонального комп'ютера ПК.



ВК - відеокамера, МП1, МП2 - механізм переміщення, Д1, Д2 - двигун, БУ - блок управління, БІ - блок інтерфесів, ПК - персональний комп'ютер, П - підвіс, К - капіляр, Р - рідина, С - стіл, По - посудина

Рисунок 3.3 – Функціональна схема приладу

Прилад працює наступним чином. Капіляр опускається в рідину і піднімається над рівнем рідини. Відеокамера переміщується так, щоб в поле зору попали меніски в капілярі і під ним. Робиться цифрова фотографія менісків рідини. Фотографія

передається в програмне забезпечення комп'ютера. Положення відеокамери фіксується відносно верхнього меніска рідини.

Далі капіляр опускається в рідину і одночасно здійснюється переміщення відеокамери так, щоб зберігалось положення відеокамери відносно місця розташування верхнього меніска. Переміщення капіляра і відеокамери продовжується до тих пір, поки, після моменту контакту з поверхнею рідини, відновиться положення верхнього меніска в капілярі. Цей момент контролюють на отриманому зображенні в автоматизованому режимі за допомогою програмного забезпечення комп'ютера. Роблять другу цифрову фотографію меніска.

На основі отриманих фотографій вимірюють розміри нижнього меніска, відстаней між менісками. А на основі інформації про переміщення відеокамери і другої фотографії – висоту підняття меніска в капілярі при контакті капіляра з рідиною. На основі отриманих величин значення поверхневого натягу розраховують згідно виразів в розділі 2.2.

Висновки до розділу

Згідно із зробленою роботою в цьому розділі можна зробити такі висновки:

а) розроблено функціональні схеми приладів для контролю поверхневого натягу рідин методом меніска біля вертикальної стінки, які реалізують контроль поверхневого натягу шляхом вимірювання різних параметрів меніска;

б) розроблено функціональну схему пристрою контролю поверхневого натягу рідин методом двох менісків, який реалізує контроль поверхневого натягу шляхом вимірювання відстані між менісками і радіусу нижнього меніска.

4 МЕТРОЛОГІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИН

4.1 Аналіз складових невизначеностей контролю

Вимірювання — це процес визначення числового значення фізичної величини за допомогою спеціальних приладів, які порівнюють цю величину з еталоном.

За способом отримання даних розрізняють кілька типів вимірювань:

Прямі вимірювання: безпосереднє порівняння величини з її одиницею.

Опосередковані (непрямі) вимірювання: визначення величини через залежність від інших величин, які вимірюються безпосередньо. Вони використовуються, коли пряме вимірювання неможливе або недоцільне.

Сукупні вимірювання: розв'язання системи рівнянь на основі одночасних вимірювань кількох однорідних величин.

Сумісні вимірювання: вимірювання двох або більше однорідних величин для виявлення взаємозв'язків між ними.

Експериментальні дані, отримані в результаті спостережень (однократних або багаторазових), стають результатами вимірювань лише після обробки, визначення точності та форматування. Результат вимірювання включає в себе значення вимірної величини та оцінку його точності. Точність визначається характеристиками похибок вимірювань.

Результат вимірювання завжди є наближеним значенням вимірюваної величини, а не її точним значенням. Точність вимірювання показує, наскільки близький отриманий результат до істинного (справжнього) значення. Відхилення результату вимірювання від істинного значення називається похибкою.

Похибки вимірювань поділяються на три основні категорії:

Систематичні похибки: це похибки, які залишаються постійними або змінюються передбачувано. Прикладом може бути неправильне градуювання приладу. Наприклад, якщо стрілка вольтметра зігнута, це призведе до систематичної похибки.

Випадкові похибки: ці похибки виникають через невідомі фактори, що впливають на вимірювання. Вони мають випадковий характер, і їхнє значення неможливо передбачити. Метрологічні характеристики, пов'язані з випадковими похибками, включають:

Збіжність: наскільки близькі результати вимірювань, виконаних в однакових умовах.

Відтворюваність: наскільки близькі результати вимірювань, виконаних різними методами або в різних місцях.

Сукупність цих характеристик визначає точність вимірювання.

Грубі похибки (промахи): це великі помилки, які виникають через грубі порушення умов вимірювання, неправильний запис даних або несправність приладу. Статистичний аналіз використовується для виявлення цих промахів серед інших випадкових відхилень.

Похибка вимірювання, позначена як Δx , у виразі $x = x_{\text{найкрац}} \pm \Delta x$, вказує на надійність або точність проведеного вимірювання. Однак, для повної характеристики якості вимірювання, важливо враховувати не лише величину похибки Δx , а й її співвідношення з найкращим значенням $x_{\text{найкрац}}$. Це приводить до поняття відносної похибки, яку ми будемо позначати як δx .

$$\delta x = \frac{\Delta x}{|x_{\text{найкрац}}|}$$

Відносна похибка, також відома як точність вимірювання, використовується для оцінки якості вимірювань. Щоб уникнути плутанини, саму похибку Δx іноді називають абсолютною похибкою. Зазвичай, в точних вимірюваннях абсолютна похибка Δx значно менша за виміряну величину $x_{\text{найкрац}}$. Оскільки відносна похибка

$$\delta x = \frac{\Delta x}{|x_{\text{найкрац}}|},$$

як правило, є невеликим числом, часто зручно виражати її у відсотках, помноживши на 100.

Відносна похибка надає приблизну оцінку якості вимірювань, незалежно від значення вимірюваної величини. Найбільш важливим аспектом розуміння відносної похибки є її вплив при множенні виміряних значень.

Якщо вимірювання x і y проводяться незалежно і обидва підкоряються

нормальному розподілу, то похибка $q=x+y$ може бути виражена наступним чином:

$$\Delta q = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$$

Якщо похибки в x, \dots, w незалежні і випадкові, то відносна похибка в q є квадратичною сумою вихідних відносних похибок:

$$\delta_q = \sqrt{(\delta x)^2 + \dots + (\delta z)^2 + (\delta u)^2 + \dots + (\delta w)^2}.$$

Якщо величина x виміряна з похибкою Δx і її використовують для розрахунку функції $q(x)$, то похибка Δq буде обчислюватись так:

$$\Delta q = \left| \frac{\partial q}{\partial x} \right| * \Delta x.$$

Розглянемо загальну формулу для розрахунку похибок у непрямих вимірюваннях, тобто похибку функції кількох змінних. Припустимо, що змінні x, \dots, z , виміряні з похибками $\Delta x, \dots, \Delta z$, і що ці виміряні значення використовують для обчислення функції $q = f(x, \dots, z)$. Якщо похибки в x, \dots, z є незалежними та випадковими, то похибка у q може бути обчислена за наступною формулою:

$$\Delta q = \sqrt{\left(\frac{\partial q}{\partial x} \Delta x\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial q}{\partial y} \Delta y\right)^2}.$$

Існує безліч факторів, що призводять до виникнення похибок у вимірюваннях. Ці фактори, відрізняючись за своєю природою, по-різному впливають на кінцевий результат. У зв'язку з цим розроблені різні методи як для зменшення впливу похибок, так і для оцінки їхнього впливу на результати вимірювань. Для більш глибокого розуміння цих аспектів проводиться всебічний аналіз похибок, використовуючи різні класифікаційні ознаки, найважливіші з яких представлені на рис. 4.1.

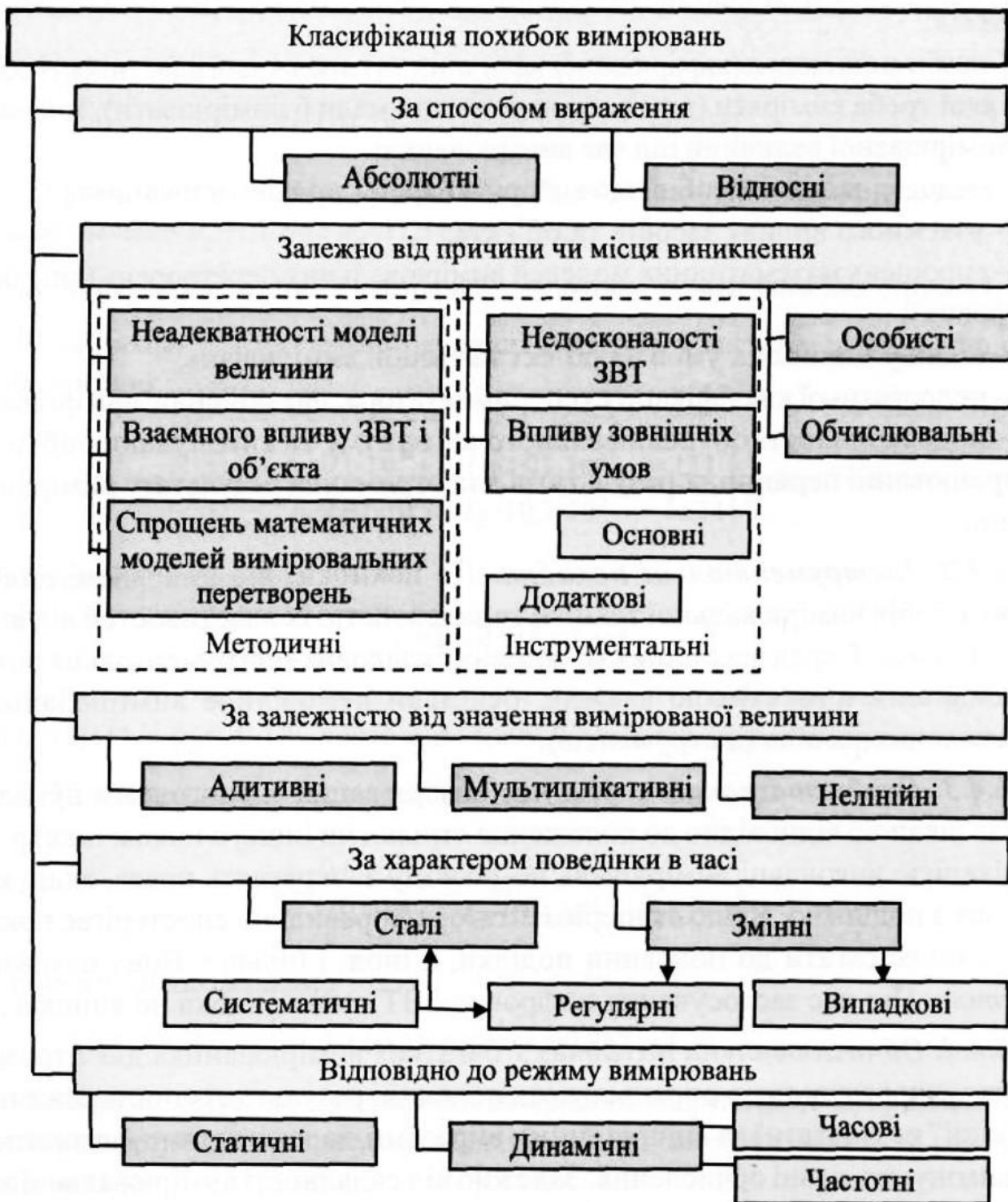


Рисунок 4.1 – Класифікація похибок вимірювань

Ось перепарування тексту про складові похибок та їх класифікацію:

Похибки можна класифікувати за різними критеріями. Залежно від причини або місця виникнення, виділяють наступні основні складові похибок:

Неточності моделі: відмінність між моделлю вимірюваної величини та справжньою властивістю об'єкта, включаючи зміни вимірюваної величини під час вимірювання.

Недосконалість засобів вимірювання: похибки, пов'язані з характеристиками використовуваних приладів.

Взаємний вплив: вплив засобів вимірювання на об'єкт і навпаки.

Спрощення моделей: похибки, що виникають через спрощення математичних моделей перетворень (аналогових та цифрових).

Зовнішні умови: вплив зовнішніх факторів на об'єкт та засоби вимірювань.

Кваліфікація експериментатора: похибки, пов'язані з недостатньою кваліфікацією особи, що проводить вимірювання.

Обчислювальні алгоритми: похибки, що виникають через недосконалість обчислювальних алгоритмів та обчислень при обробці даних.

Відповідно до режиму вимірювань, розрізняють:

Статичні похибки: виникають при статичних вимірюваннях, коли вимірювана величина не змінюється протягом експерименту, і в засобах вимірювання завершені перехідні процеси.

Динамічні похибки: виникають при динамічних вимірюваннях, коли вимірювана величина змінюється під час експерименту, або якщо в засобах вимірювання ще тривають перехідні процеси.

4.2 Аналіз похибок методу меніска біля плоскої стінки

Розглянемо складові похибок вимірювання поверхневого натягу методом з вимірюванням висоти підняття меніска біля вертикальної стінки (рис. 4.2). До основних складових похибок належать вимірювання висоти меніска, задавання значення прискорення вільного падіння, вимірювання густин фаз, визначення кута θ між меніском рідини і вертикальною стінкою. Розглянемо причини виникнення цих похибок. Визначати висоту підняття меніска і кут θ в приладі можна за допомогою цифрового мікроскопа, підключеного до персонального комп'ютера, у відповідному програмному забезпеченні. Тому для цих двох складових притаманні однакові джерела похибок: дискретність і нечіткість цифрового зображення. Для визначення висоти меніска притаманна складова похибки: калібрування. Ця

похибка виникає через недосконалість засобів які використовують для виконання калібрування, наприклад калібрувальної сітки або шкали. Визначення кута θ в програмному забезпеченні можливе як прямим вимірюванням віртуальним інструментом "кутоміром" в програмному забезпеченні, так і автоматизованим засобом, наприклад апроксимацією точок контуру меніска біля точки трифазного контакту. Обчислене значення похідної в точці трифазного контакту рівне $\text{tg}\theta$.

Дві складові — прискорення вільного падіння і густина (або різниця густин) фаз виникають в результаті або задавання наперед відомих значень або вимірювання іншими засобами. Таким чином вказані похибки залежать від похибок використаних приладів для отримання цих величин.

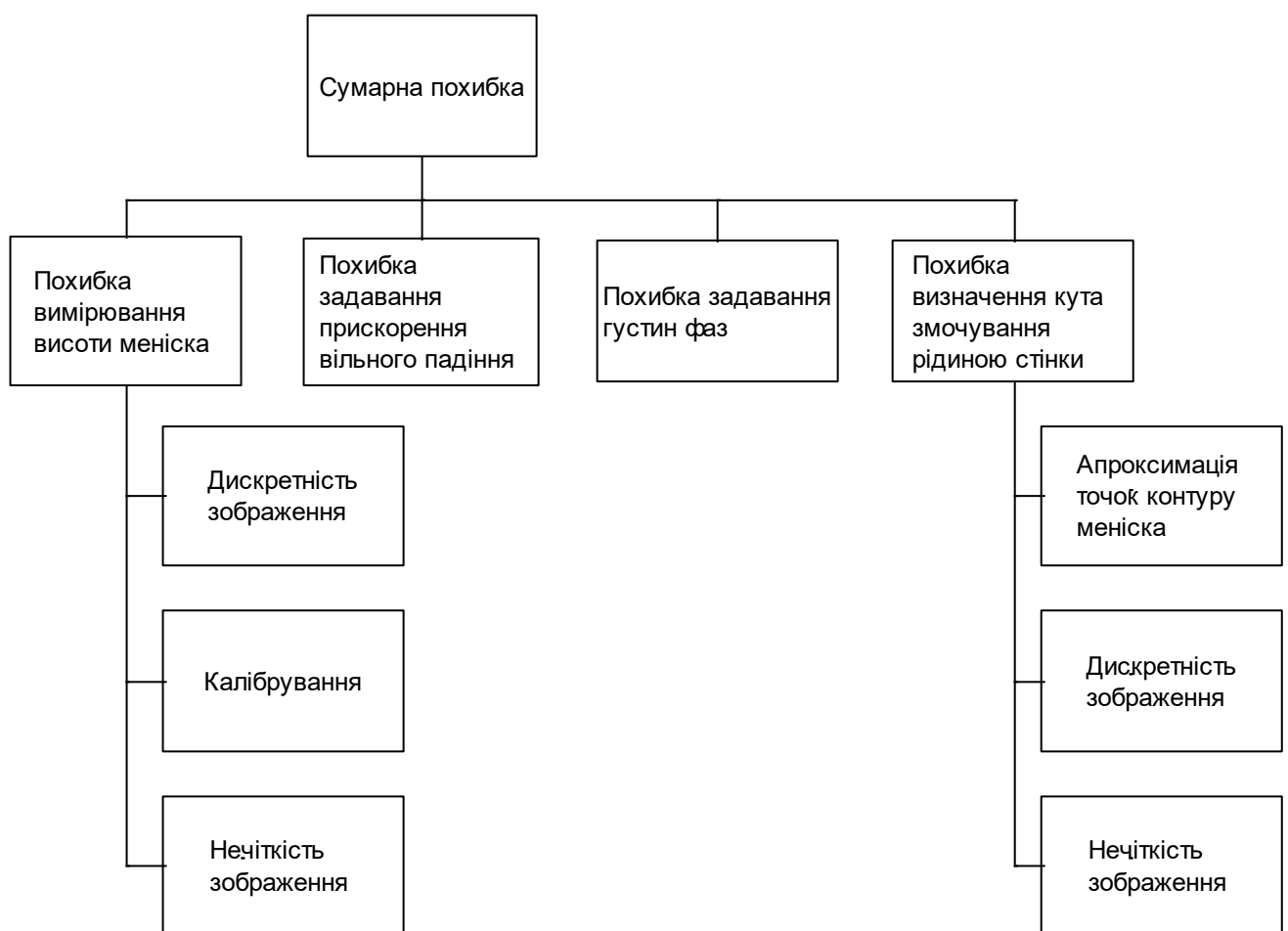


Рисунок 4.2 – Накопичення похибок в методі з вимірюванням висоти меніска

Розглянутий метод відноситься до методів опосередкованих вимірювань. Сумарну похибку таких методів розраховують із врахуванням коефіцієнтів ваги кожного параметра, який входить у розрахункову формулу. Ці коефіцієнти ваги розраховують як часткові похідні. Взнявши часткові похідні від виразу (2.27), отримаємо:

$$\frac{\partial \gamma}{\partial z_c} = -\frac{g \cdot z_c (\rho^\alpha - \rho^\beta)}{\sin \theta - 1},$$

$$\frac{\partial \gamma}{\partial g} = -\frac{z_c^2 (\rho^\alpha - \rho^\beta)}{\sin \theta - 1},$$

$$\frac{\partial \gamma}{\partial \rho_\alpha} = -\frac{g \cdot z_c^2}{\sin \theta - 1},$$

$$\frac{\partial \gamma}{\partial \rho_\beta} = -\frac{g \cdot z_c^2}{\sin \theta - 1},$$

$$\frac{\partial \gamma}{\partial \theta} = -\frac{g \cdot z_c^2 \cdot \cos \theta (\rho^\alpha - \rho^\beta)}{(\sin \theta - 1)^2}.$$

Сумарну похибку визначають так:

$$\Delta \gamma = \sqrt{\left(\frac{\partial \gamma}{\partial z_c}\right)^2 \Delta z_c^2 + \left(\frac{\partial \gamma}{\partial g}\right)^2 \Delta g^2 + \left(\frac{\partial \gamma}{\partial \rho_\alpha}\right)^2 \Delta \rho_\alpha^2 + \left(\frac{\partial \gamma}{\partial \rho_\beta}\right)^2 \Delta \rho_\beta^2 + \left(\frac{\partial \gamma}{\partial \theta}\right)^2 \Delta \theta^2}. \quad (4.1)$$

Розглянемо похибки визначення поверхневого натягу методу меніска біля вертикальної стінки з вимірюванням різниць координат точок меніска по двох точках.

Розрахунок похибок вимірювань на основі рівняння (3.4) передбачає знаходження коефіцієнтів K_1 і K_2 при калібруванні приладу, що являє собою сумісні вимірювання. Переписавши рівняння (3.4) так:

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{(\rho^\alpha - \rho^\beta) \Delta x^2 + K_2}{K_1 (\rho^\alpha - \rho^\beta) \Delta x^2}, \quad (4.2)$$

отримаємо наступну систему рівнянь для знаходження коефіцієнтів:

$$\begin{cases} K_2 \sum_i \frac{1}{X_i \gamma_i} + \sum_i \frac{1}{\gamma_i} - \frac{K_2^2}{K_1} \sum_i \frac{1}{X_i} - \frac{2K_2 n}{K_1} - \frac{1}{K_1} \sum_i X_i = 0; \\ \sum_i \frac{1}{X_i \gamma_i} + \frac{K_2}{K_1} \sum_i \frac{1}{X_i^2} + \frac{1}{K_1} \sum_i \frac{1}{X_i} = 0, \end{cases} \quad (4.3)$$

де $X_i = (\rho^\alpha - \rho^\beta) \Delta x^2$, n – кількість зроблених вимірювань поверхневого натягу при калібруванні приладу.

Аналітичний розв'язок системи рівнянь (4.3) неможливий. В такому випадку отримати розв'язок системи рівнянь (4.3) можливо числовими методами, але для

отримання результатів потрібно мати результати вимірювань.

Середнє квадратичне відхилення результатів сукупних вимірювань знаходять за формулою

$$S = \sqrt{\frac{D_{(j+1)(j+1)}}{D} \frac{\sum_{i=1}^n \left(\gamma_i - \frac{K_1(\rho^\alpha - \rho^\beta) \Delta x_i^2}{(\rho^\alpha - \rho^\beta) \Delta x_i^2 + K_2} \right)^2}{n-m}}, \quad (4.4)$$

де m – кількість рівнянь, $D_{(j+1)(j+1)}$ – алгебраїчне доповнення елементів головного визначника D , який отримується шляхом видалення з матриці визначника стовпця $(j+1)$ і рядка $(j+1)$.

Довірчі границі випадкової похибки сукупних вимірювань становлять

$$\Delta \gamma = \pm t_p \cdot S. \quad (4.5)$$

Розглянемо похибки вимірювання поверхневого натягу із визначенням різниці висот між двома точками меніска Δz . Схема накопичення похибок представлена на рис. 4.3.

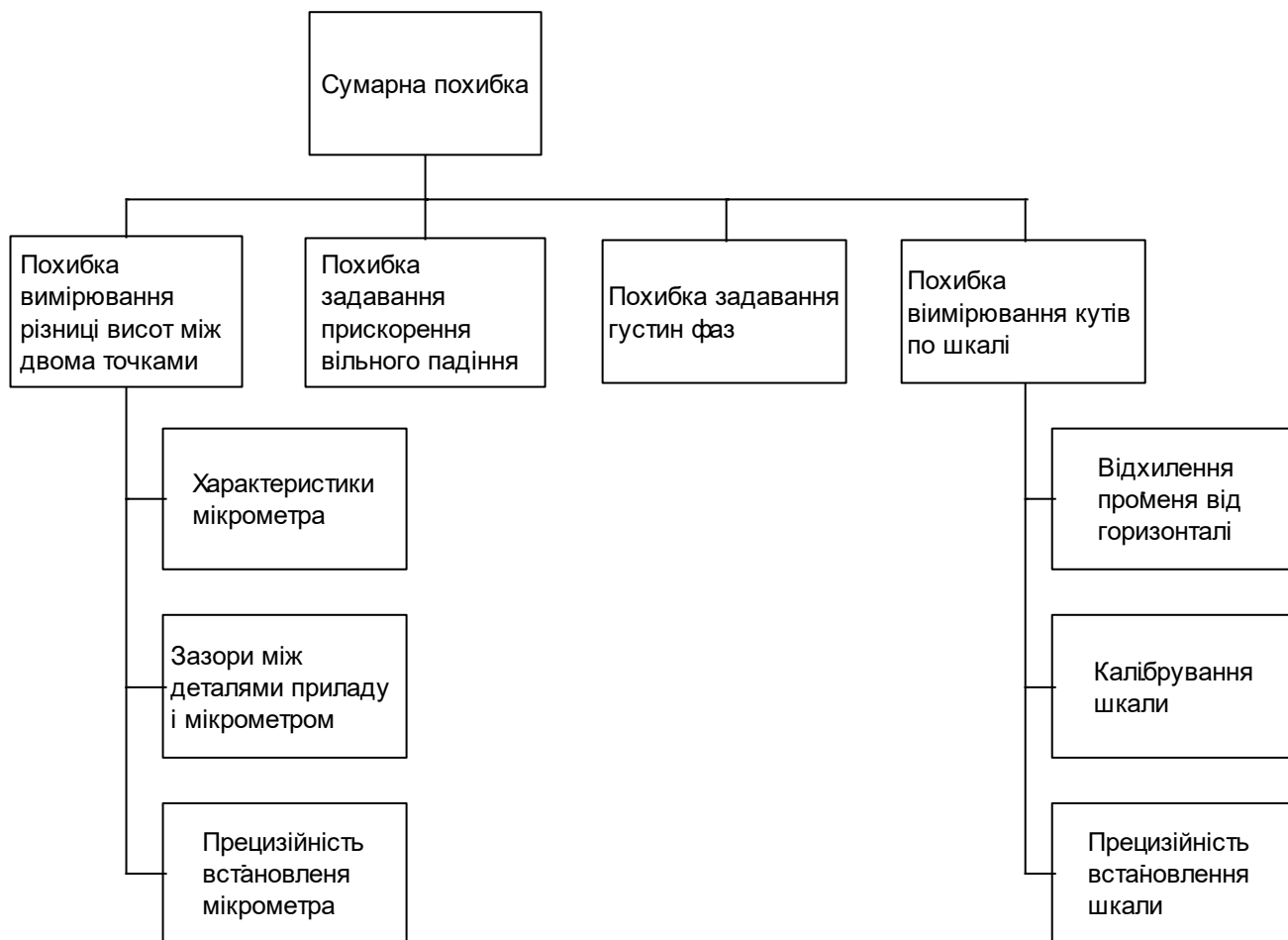


Рисунок 4.3 – Накопичення похибок в методі з вертикальним зміщенням променя

Джерела похибок задавання прискорення вільного падіння і задавання густин

фаз є аналогічними розглянутим в попередньому методі. Характерними для цього приладу є похибки вимірювання різниці висот між двома точками меніска і вимірювання кутів по шкалі приладу. Вимірювання різниці висот між точками меніска виконують мікрометром. Похибка вимірювань містить наступні складові. Метрологічні характеристики мікрометра і похибка зчитування показів зі шкали. Наявність зазорів між елементами приладу, а також між предметним столом приладу і ногою мікрометра в точці контакту. Третьою складовою є прецизійність встановлення мікрометра в приладі, наприклад відхилення розміщення мікрометра від перпендикуляру.

Розрахунок поверхневого натягу на основі рівняння (2.29) також є опосередкованими вимірюваннями. Відповідно складові похибок розраховують із врахуванням коефіцієнтів ваги (часткових похідних від (2.29)). Підставивши (2.12) в (2.29), отримуємо наступні вирази:

$$\frac{\partial \gamma}{\partial \rho^{\alpha}} = \frac{g \Delta z^2}{2 \left(\sin \left(\frac{\varphi_1}{2} \right) - \sin \left(\frac{\varphi_2}{2} \right) \right)^2},$$

$$\frac{\partial \gamma}{\partial \rho^{\beta}} = - \frac{g \Delta z^2}{2 \left(\sin \left(\frac{\varphi_1}{2} \right) - \sin \left(\frac{\varphi_2}{2} \right) \right)^2},$$

$$\frac{\partial \gamma}{\partial g} = \frac{(\rho^{\alpha} - \rho^{\beta}) \Delta z^2}{2 \left(\sin \left(\frac{\varphi_1}{2} \right) - \sin \left(\frac{\varphi_2}{2} \right) \right)^2},$$

$$\frac{\partial \gamma}{\partial \Delta z} = \frac{g (\rho^{\alpha} - \rho^{\beta}) \Delta z}{\left(\sin \left(\frac{\varphi_1}{2} \right) - \sin \left(\frac{\varphi_2}{2} \right) \right)^2},$$

$$\frac{\partial \gamma}{\partial \varphi_1} = - \frac{g (\rho^{\alpha} - \rho^{\beta}) \Delta z^2 \cos \left(\frac{\varphi_1}{2} \right)}{\left(\sin \left(\frac{\varphi_1}{2} \right) - \sin \left(\frac{\varphi_2}{2} \right) \right)^3},$$

$$\frac{\partial \gamma}{\partial \varphi_2} = \frac{g (\rho^{\alpha} - \rho^{\beta}) \Delta z^2 \cos \left(\frac{\varphi_2}{2} \right)}{\left(\sin \left(\frac{\varphi_1}{2} \right) - \sin \left(\frac{\varphi_2}{2} \right) \right)^3}.$$

Сумарну похибку визначають так:

$$\Delta\gamma = \left[\left(\frac{\partial\gamma}{\partial z_c} \right)^2 \Delta(\Delta z)^2 + \left(\frac{\partial\gamma}{\partial g} \right)^2 \Delta g^2 + \left(\frac{\partial\gamma}{\partial \rho_\alpha} \right)^2 \Delta \rho_\alpha^2 + \left(\frac{\partial\gamma}{\partial \rho_\beta} \right)^2 \Delta \rho_\beta^2 + \left(\frac{\partial\gamma}{\partial \varphi_1} \right)^2 \Delta \varphi_1^2 + \left(\frac{\partial\gamma}{\partial \varphi_2} \right)^2 \Delta \varphi_2^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (4.6)$$

4.3 Аналіз похибок методу двох менісків

Розглянемо схему накопичення похибок в даному методі (рис. 4.4). Як видно із цієї схеми даному методі вимірювання притаманні такі ж самі похибки як і на рис. 4.2.

Аналогічно до розглянутих в попередньому підрозділі методів, цей метод також є методом опосередкованих вимірювань, тому сумарну похибку розраховують із врахуванням коефіцієнтів ваги (рівняння (2.33) і (2.12)):

$$\frac{\partial\gamma}{\partial g} = \frac{(\rho^\alpha - \rho^\beta) \left(h_1 x_e - \frac{x_e^2}{3} \right)}{2},$$

$$\frac{\partial\gamma}{\partial \rho^\alpha} = \frac{g \left(h_1 x_e - \frac{x_e^2}{3} \right)}{2},$$

$$\frac{\partial\gamma}{\partial \rho^\beta} = -\frac{g \left(h_1 x_e - \frac{x_e^2}{3} \right)}{2},$$

$$\frac{\partial\gamma}{\partial h_1} = \frac{(\rho^\alpha - \rho^\beta) g x_e}{2},$$

$$\frac{\partial\gamma}{\partial x_e} = \frac{g(\rho^\alpha - \rho^\beta) \left(h_1 - \frac{2x_e}{3} \right)}{2}.$$

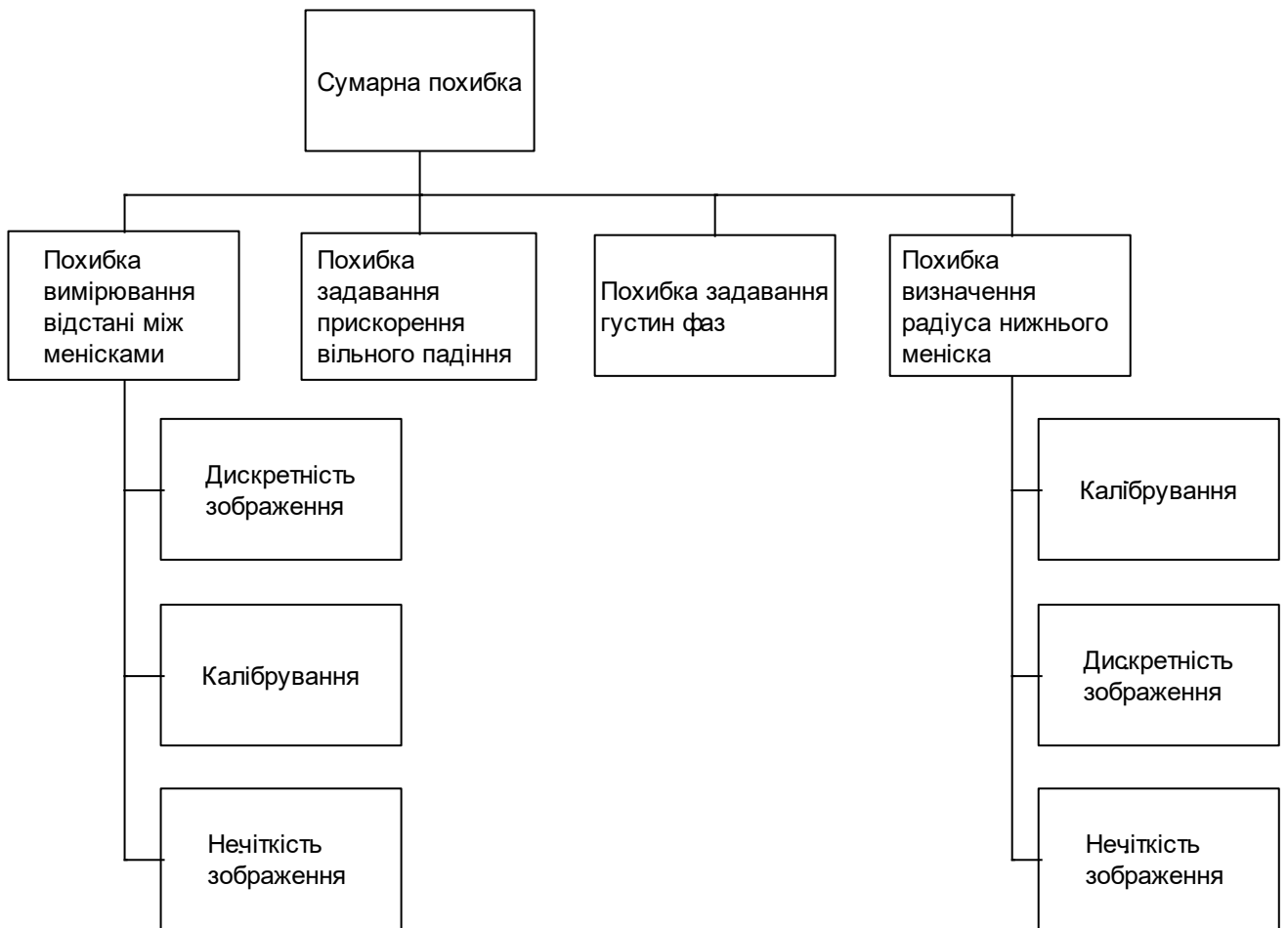


Рисунок 4.4 – Накопичення похибок в методі з вимірюванням висоти меніска

Сумарну похибку визначають так:

$$\Delta\gamma = \sqrt{\left(\frac{\partial\gamma}{\partial h_1}\right)^2 \Delta h_1^2 + \left(\frac{\partial\gamma}{\partial g}\right)^2 \Delta g^2 + \left(\frac{\partial\gamma}{\partial \rho_\alpha}\right)^2 \Delta \rho_\alpha^2 + \left(\frac{\partial\gamma}{\partial \rho_\beta}\right)^2 \Delta \rho_\beta^2 + \left(\frac{\partial\gamma}{\partial x_e}\right)^2 \Delta x_e^2}. \quad (4.7)$$

Коефіцієнти ваги для виразу (2.38) з врахуванням (2.12) будуть такими:

$$\frac{\partial\gamma}{\partial g} = \frac{h_1 x_e (\rho^\alpha - \rho^\beta) \left(\sqrt{1 - \frac{4x_e}{3h_1}} + 1 \right)}{4},$$

$$\frac{\partial\gamma}{\partial \rho^\alpha} = \frac{g h_1 x_e \left(\sqrt{1 - \frac{4x_e}{3h_1}} + 1 \right)}{4},$$

$$\frac{\partial\gamma}{\partial \rho^\beta} = -\frac{g h_1 x_e \left(\sqrt{1 - \frac{4x_e}{3h_1}} + 1 \right)}{4},$$

$$\frac{\partial \gamma}{\partial h_1} = \frac{g \cdot x_e (\rho^\alpha - \rho^\beta) \left(\sqrt{1 - \frac{4x_e}{3h_1}} + 1 \right)}{4} + \frac{g \cdot x_e^2 (\rho^\alpha - \rho^\beta)}{6h_1 \sqrt{1 - \frac{4x_e}{3h_1}}},$$

$$\frac{\partial \gamma}{\partial x_e} = \frac{g \cdot h_1 (\rho^\alpha - \rho^\beta) \left(\sqrt{1 - \frac{4x_e}{3h_1}} + 1 \right)}{4} + \frac{g \cdot x_e (\rho^\alpha - \rho^\beta)}{6 \sqrt{1 - \frac{4x_e}{3h_1}}}.$$

Сумарну похибку розраховують згідно (4.7).

Висновки до розділу

На основі приведенного матеріалу розділу можна зробити такі висновки:

- а) здійснений аналіз похибок досліджених методів меніска біля вертикальної стінки і двох менісків контролю поверхневого натягу рідин визначення поверхневого натягу рідин;
- б) отримано вирази часткових похідних для розрахунку сумарної похибки контролю поверхневого натягу запропонованими приладами і методами.

ВИСНОВКИ

Згідно виконаної роботи можна привести такі висновки:

1. Зроблено аналіз поверхневих властивостей рідин і відомих методів контролю поверхневого натягу рідин.
2. Досліджено методи меніска біля вертикальної стінки і двох менісків контролю поверхневого натягу рідин.
3. Запропоновано оптимальний набір параметрів менісків, що вимірюють для визначення поверхневого натягу рідин дослідженими методами.
4. Розроблено функціональні схеми приладів, які реалізують досліджені методи контролю поверхневого натягу рідин.
5. Зроблений аналіз складових похибок контролю поверхневого натягу дослідженими методами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Поверхневий натяг рідин. Сила поверхневого натягу. Змочування. Капілярні явища. – URL: <https://disted.edu.vn.ua/courses/learn/272>.
2. Сили поверхневого натягу – URL: https://wiki.tntu.edu.ua/Сили_поверхневого_натягу.
3. Властивості рідин. Поверхневий натяг – URL: <https://sites.google.com/site/molekulyarnafizika/osnovni-ponatta-molekularno--kineticnoie-teoriie/vlastivosti-ridin-poverhnevij-natag>.
4. Авотін С. С. Фізика : навч. посібник /Харк. нац. аграр. ун-т. –Х., 2015.– 296 с.
5. Сили поверхневого натягу – URL: https://wiki.tntu.edu.ua/Сили_поверхневого_натягу
6. Некрасов О. П. Поверхневі явища і дисперсійні системи: навч. посіб./ О. П. Некрасов, Б. А. Веретенченко. – Харків: НТУ ХПІ, 2018.-112с
7. Русанов А. И. Межфазная тензиометрия / А. И. Русанов, В. А. Прохоров. — СПб: Химия, 1994. — 400 с.
8. Іващенко Ю. М Основи прецизійного вимірювання поверхневого натягу розплавів металів за методом лежачої краплі. / Ю. М. Іващенко, В. Н. Єрмоменко — К.: Наукова думка, 1972.
9. Porter A. W. // Phil. Mag. Ser. 7. 1933. - V. 15, № 96. - P. 163-170.
10. Dorsey N. E. // J. Washington Acad. Sci. 1928. V. 18, № 19. - P. 505-509.
11. Bashfort F., Adams J. C. An attempt to test the theories of capillary action. Cambridge: University Press, 1883. 140 p.
12. Kozakevitch P., Schatel S., Urbain G., Sage M. // Rev. Metallurg. 1955. - V. 52, № 2. - P. 139-160.
13. Coucoulas L. M., Dawe R. A. // J. Colloid Interface Sci. 1985. - V. 103, № 1. - P. 230-236; ibid. V. 106, № 2. - P. 556.
14. Andreas J. M., Hauser E. A., Tucker W. B. // J. Phys. Chem. 1938. - V. 42, № 8. - P. 1001-1019.
15. Lyons C. J., Elbing E., Wilson I. R. // J. Chem. Soc. Faraday Trans. Ser. 2. 1985.

- V. 81, № 3. - P. 327-339.

16. Горелов В. О. Вибір методу для вимірювання динамічного поверхневого натягу. / В. О. Горелов, І. С. Кісіль // Івано-Франківський державний технічний університет нафти і газу. – 2000.

17. Тензіометр К6. – URL: <https://materials-lab.com.ua/tenziometr-k6-ua>

18. Тензіометр DCA 15. – URL: <https://labteh.com/pid34224/tenziometr-dcat15-data-physics>.

19. https://msn.khnu.km.ua/pluginfile.php/350180/mod_resource/content/2/ilovepdf_com-22-37.pdf.

20. Обозовський С.С. Теоретичні основи інформаційно-вимірювальної техніки. - К.:НМКВО, 1991.-223 с.

21. Guide of the Expression of Uncertainty in Measurement. - ISO 1993,1995.

22. Ціделко В., Яремчук Н., Дворжицька М. Використання невизначеності при поданні результату вимірювання // Вимірювальна техніка та метрологія. - 2001. — № 58. — С. 125-128.

23. ДСТУ 2681-94. Метрологія. Терміни та визначення. - К.: Держстандарт України, 1994.-68с.

24. Головка Д. Б. Основи метрології та вимірювань. Навч. посібник. / Д. Б. Головка, К. Г. Реґо, Ю. О. Скрипник // -К.: Либідь, 2001.-408 с.

25. Поліщук Є.С. Метрологія та вимірювальна техніка. / Є. С. Поліщук, М. М. Дорожовець, В. О. Яцук та ін.// -Львів: Бескид Біт, 2003. - 544 с.