

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В.Н. КАРАЗІНА  
ФІЗИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
КАФЕДРА ЗАГАЛЬНОЇ ФІЗИКИ

“Допущено до захисту”

Зав. кафедрою загальної фізики

проф. Лазоренко О. Б.

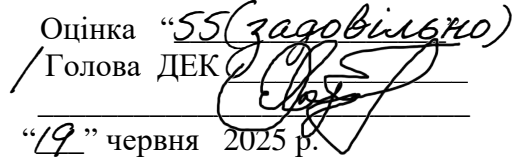
“16” червня 2025 р.



Оцінка “55(задовільно)”

/ Голова ДЕК

“19” червня 2025 р.



Гур'єв Е. В.

Методи визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідини

Дипломна робота на здобуття  
освітньо-кваліфікаційного  
рівня  
8.070101 – “Бакалавр” за  
напрямом  
підготовки 104 – “фізика та  
астрономія”

Науковий керівник – доцент  
кафедри загальної фізики ХНУ  
імені В.Н. Каразіна, канд. фіз.-  
мат. наук Горбач В.М.

Харків 2025

## Анотація

Гур'єв Е.В. Методи визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідини. – Рукопис, сторінки, малюнків.

Дипломна робота на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня "бакалавр" за напрямом підготовки 104 – "фізика та астрономія". Харків. 2025.

Дипломна робота має реферативний характер. Розглянуто явища на межі рідини, умови рівноваги на межі двох середовищ, фізичні основи змочування та капілярних явищ. Наведено опис найбільш поширених методів вимірювання коефіцієнта поверхневого натягу.

Ключові слова: капілярні явища, поверхневий натяг, крайовий кут, коефіцієнт поверхневого натягу, методи визначення коефіцієнта поверхневого натягу.

## Abstracts.

Guryev E.V. Methods for determining the surface tension coefficient of a liquid.

Diploma thesis for obtaining the educational qualification level 'Bachelor' in the field of training 104 - 'Physics and Astronomy'. Kharkiv. 2025.

The thesis is of an abstract nature. The phenomena at the fluid interface, the conditions of equilibrium at the interface of two media, the physical basis of wetting and capillary phenomena are considered. The most common methods of measuring the surface tension coefficient are described.

**Key words:** capillary phenomena, surface tension, boundary angle, surface tension coefficient, methods for determining the surface tension coefficient.

## Зміст

	Вступ	5
1	Теоретичні основи поверхневого натягу	6
1.1	Рідина	6
1.2	Поверхнева енергія	7
1.3	Сили поверхневого натягу	8
1.4	Краєві кути. Змочування та незмочування	9
1.5	Тиск під викривленою поверхнею рідини	11
1.6	Капілярні явища	12
2	Методи визначення коефіцієнта поверхневого натягу	14
2.1	Метод капілярного підняття	14
2.2	Метод Дю Нуї (відрив кільця)	14
2.3	Метод відриву краплі (сталактитний)	15
2.4	Метод аналізу форми краплі	16
2.5	Метод максимального тиску пухирця.	17
2.6	Метод падаючої краплі	18
2.7	Метод обертальної краплі	19
3	Порівняльний аналіз методів визначення коефіцієнта поверхневого натягу	21
3.1	Узагальнені критерії оцінки методів	21
3.2	Метод капілярного підняття	21
3.3	Метод Дю Нуї (відрив кільця).	22
3.4	Метод сталактитного відриву краплі.	22
3.5	Метод аналізу форми краплі	22
3.6	Метод максимального тиску пухирця	23
3.7	Метод падаючої краплі (пінметрія).	23
3.8	Метод обертальної краплі	23
3.9	Порівняльна таблиця.	24
3.10	Висновки до розділу	24
	Висновки	24
	Список використаної літератури	26

## Вступ

Одним із важливих явищ, що визначає поведінку рідин, є поверхневий натяг. Це явище має фундаментальне значення в багатьох природних і технологічних процесах – від капілярного підняття води в ґрунті до розробки нових матеріалів і нанотехнологій. Розуміння механізмів дії сил поверхневого натягу є необхідним для дослідників, інженерів та спеціалістів різних галузей.

Актуальність теми дослідження зумовлена широким спектром застосування знань про поверхневі явища в таких галузях, як біофізика, хімічна технологія, медицина, харчова промисловість, мікроелектроніка. Методи визначення коефіцієнта поверхневого натягу дозволяють оцінити фізико-хімічні властивості рідин, встановити якість речовин, контролювати процеси змочування та адгезії.

Мета роботи – проаналізувати основні методи визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідини та оцінити їх переваги й недоліки.

Завдання роботи:

- провести літературний огляд з питань, пов'язаних з поверхневим натягом;
- описати основні методи визначення коефіцієнта поверхневого натягу;
- провести порівняльний аналіз методів за точністю, складністю та практичним застосуванням.

Об'єкт дослідження — поверхневий натяг рідини.

Предмет дослідження — методи визначення коефіцієнта поверхневого натягу.

## Розділ 1. Теоретичні основи поверхневого натягу

### 1.1. Рідина

Рідина є одним із трьох основних агрегатних станів речовини (разом із твердим і газоподібним), що характеризується здатністю зберігати свій об'єм, але не має сталої форми. Вона набуває форми тієї посудини, в якій знаходиться. Основною фізичною особливістю рідини є те, що її молекули перебувають у тісному контакті одна з одною, хоча й зберігають здатність до переміщення. Це створює специфічні властивості, які відрізняють рідину від інших агрегатних станів: вона не має власної форми, але має певний ступінь впорядкованості на коротких відстанях.

На молекулярному рівні, сили взаємодії між частинками рідини сильніші, ніж у газах, але слабші, ніж у твердих тілах. Це обумовлює те, що молекули рідини не займають фіксованих позицій, як у кристалічній решітці, проте вони і не розлітаються вільно, як у газі. У рідинах відсутня далеко діюча впорядкованість, але наявна короткочасна локальна впорядкованість, яка виникає через міжмолекулярні сили. Ці сили забезпечують існування когезії — притягання молекул одна до одної, що, своєю чергою, обумовлює появу таких явищ, як в'язкість, змочування і поверхневий натяг.

Фізичні властивості рідини можуть змінюватися під дією зовнішніх умов, зокрема температури та тиску. При підвищенні температури рідина розширюється, її молекули отримують більше кінетичної енергії і можуть легше подолати сили притягання, що веде до переходу в газоподібний стан. При зниженні температури рух молекул сповільнюється, що може призвести до кристалізації рідини — переходу в твердий стан. Також рідини можуть перебувати в стані перенасичення або переохолодження без зміни агрегатного стану.

У практичному аспекті рідини використовуються в різноманітних сферах: як теплоносії в енергетиці, розчинники в хімії, робочі середовища в гідравлічних системах, мастильні матеріали в машинобудуванні. Особливий інтерес викликають рідини з аномальними властивостями, наприклад, вода, яка має найвищу густину не при температурі замерзання, а при 4°C. Це забезпечує життєдіяльність організмів у водоймах під час зими.

Усі наведені властивості рідин, а також закономірності, які керують поведінкою молекул, є важливими для розуміння більш складних явищ — зокрема, поверхневого натягу, що виникає саме внаслідок відмінностей у розташуванні молекул у середині рідини та на її поверхні.

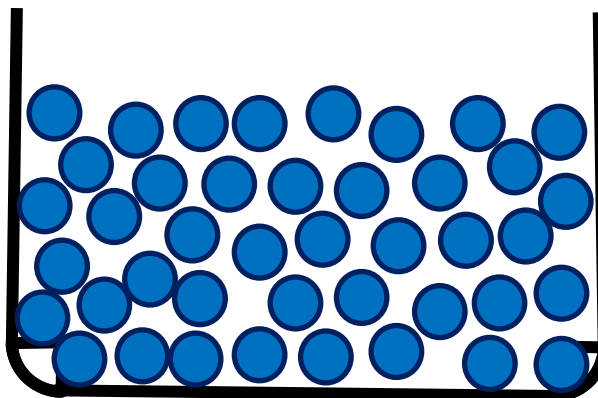


Рис. 1 – Схематичне зображення структури рідини. Спостерігається ближній порядок. Відсутній дальній порядок.

## 1.2. Поверхнева енергія

Поверхнева енергія — це один із фундаментальних параметрів, що описує поведінку рідин на їхніх межах із газовим середовищем або твердим тілом. Вона виникає через те, що молекули, які знаходяться на межі розділу фаз, тобто на поверхні рідини, перебувають у фізично відмінному стані порівняно з молекулами у внутрішньому об'ємі. Молекули всередині рідини оточені однаковими сусідами з усіх боків і перебувають у стані рівноваги, тоді як молекули на поверхні мають менше сусідів і відчувають незбалансовані сили притягання.

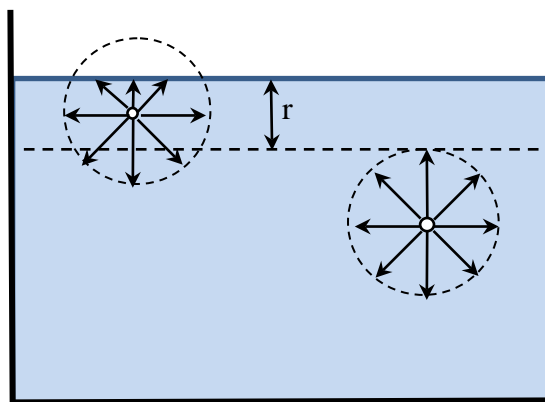


Рис.2 – Схематичне зображення молекули в глибині рідини (праворуч) і в поверхневому шарі (ліворуч);  $r$  - радіус молекулярної дії

Саме через це для переміщення молекули з глибини рідини на її поверхню необхідно виконати роботу — подолати сили когезії. Ця робота і є проявом поверхневої енергії. Вона вимірюється як енергія, необхідна для утворення одиниці площі нової поверхні, і виражається у джоулях на квадратний метр

(Дж/м<sup>2</sup>). У термодинамічному сенсі, поверхнева енергія дорівнює вільній енергії, асоційованій із поверхневою площею.

$$dF = \sigma dS,$$

де  $F$  – вільна енергія,  $\sigma$  – коефіцієнт поверхневого натягу,  $S$  – площа поверхні тіла.

Поверхнева енергія має важливе значення у формуванні форми крапель, у процесах змочування та адгезії. Наприклад, крапля рідини набуває сферичної форми саме тому, що сфера має найменшу площу при заданому об'ємі, а отже — найменшу поверхневу енергію. Мінімізація поверхневої енергії є рушійною силою для багатьох процесів у природі та техніці.

На величину поверхневої енергії впливають температура, наявність домішок, особливо поверхнево-активних речовин (ПАР), які можуть істотно зменшити енергію межі розділу фаз. Це дозволяє використовувати ПАР у мийних засобах, виробництві косметики, фармацевтиці та харчовій промисловості.

У біологічних системах поверхнева енергія визначає стабільність клітинних мембран, взаємодію білків із водними середовищами, а також формування поверхневих структур, таких як плівки, оболонки, емульсії. У мікро- та нанотехнологіях вона відіграє вирішальну роль, адже при зменшенні масштабів поверхневі ефекти починають переважати над об'ємними.

Таким чином, поверхнева енергія — це ключове поняття для опису міжфазної взаємодії, яке має як фундаментальне, так і прикладне значення у сучасній науці і техніці.

### 1.3. Сили поверхневого натягу

Сили поверхневого натягу — це міжмолекулярні сили, які виникають на межі поділу рідини з газом або іншим середовищем. Їх поява зумовлена тим, що молекули, розташовані на поверхні рідини, перебувають в асиметричному оточенні. На них не діють сили з боку середовища, що розташоване зовні рідини, тому виникає результуюча сила, спрямована вглиб об'єму. Ця сила і є причиною того, що рідина прагне мінімізувати свою поверхню, зокрема формуючи краплі сферичної форми.

Кількісною характеристикою цього явища є коефіцієнт поверхневого натягу  $\sigma$ , який визначається як сила, що діє на одиницю довжини лінії розділу фаз. Одиниця виміру — ньютон на метр (Н/м). Формально:

$$\sigma = f/l$$

де  $f$  – сила, яка діє вздовж поверхні, а  $l$  – довжина лінії, на яку ця сила розподілена. Цей параметр є специфічним для кожної рідини і залежить від температури та домішок.

Наявність сил поверхневого натягу можна проілюструвати таким чином. Опустимо і витягнемо з мильного розчину дротяну рамку ABCD з однією рухомою стороною CD. Сили поверхневого натягу, прагнучи скоротити площу поверхні, будуть переміщати сторону CD до сторони AB. Величина сили поверхневого натягу дорівнюватиме  $2l\sigma$  (множник двійка пов'язаний з тією обставиною, що мильна плівка має дві сторони поверхні). Для того, щоб утримати рухомий бік, необхідно докласти силу  $f = 2l\sigma$ . Під час повільного ізотермічного переміщення під дією сили  $f$  рухомої сторони на відстань  $dx$  відбувається робота  $dA = f dx = 2l\sigma dx$ . Сама ж рідина здійснює роботу  $dA' = -2l\sigma dx$ . Але з іншого боку за ізотермічного процесу робота системи дорівнює убутку вільної енергії. Звідси випливає, що  $dF = \sigma dS$ .

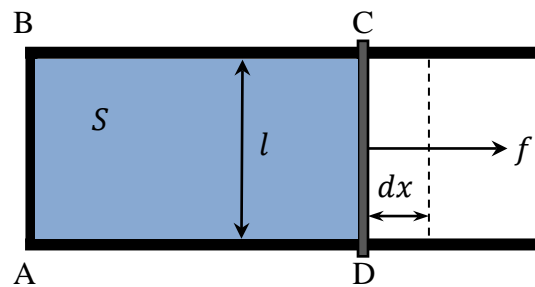


Рис. 3. Рамка з рухомою стороною, зтягнута мильною плівкою.

Сили поверхневого натягу лежать в основі ряду фізичних явищ: утворення крапель, мильних бульбашок, появи менісків, утримування води у тонких порах та тріщинах. Вони дозволяють комахам, таким як водомірки, рухатись по поверхні води, не занурюючись у неї. Також ці сили пояснюють, чому вода виливається з крана не струменем, а краплями.

У техніці й медицині розуміння сили поверхневого натягу критично важливе. Наприклад, у мікрофлюїдиці (технологіях управління рідинами в мікроскопічних каналах), поверхневі сили переважають над гравітацією. В оптиці та електроніці це використовується у створенні капілярних лінз, краплинного дозування, при виготовленні біосенсорів. Здатність керувати силами поверхневого натягу відкриває можливості для розробки наноматеріалів, самозбірних структур та лабораторій-на-чипі.

#### 1.4. Краєві кути. Змочування та незмочування

Коли рідина взаємодіє з твердою поверхнею, виникає явище змочування, яке визначається балансом сил між молекулами рідини (когезія) та молекулами твердої поверхні (адгезія). Визначальним параметром цього процесу є контактний (краєвий) кут — кут між дотичною до поверхні рідини в точці дотику і поверхнею твердого тіла.

Якщо контактний кут менший за  $90^\circ$ , кажуть, що рідина змочує поверхню – вона розтікається по ній (наприклад, вода на чистому склі). Якщо кут більший за  $90^\circ$ , рідина не змочує поверхню – вона утворює краплю майже сферичної форми (вода на парафіні або жирній поверхні).

Розглянемо фізичну природу цього явища. Розглянь краплю рідини на поверхні твердого тіла. У цьому випадку межують одна з одною три речовини - газоподібна (1), рідка (2) і тверда (3). Крапля рідини набуде такої форми, щоб сума потенційної енергії краплі рідини в полі сил тяжіння та поверхнева енергія

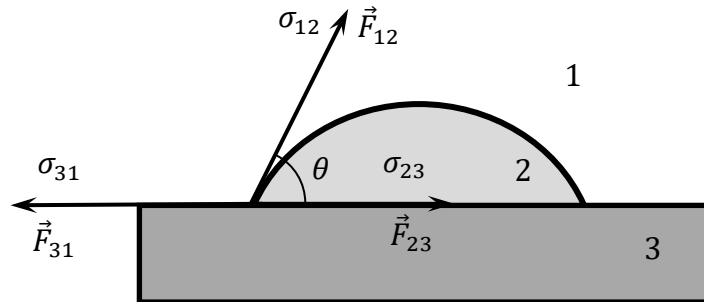


Рис. 4. Умови рівноваги сил на межі рідина - тверде тіло.

всіх тіл була мінімальною. Умова рівноваги має вигляд

$$\sigma_{31} = \sigma_{12} \cos \theta + \sigma_{23}$$

Якщо  $\sigma_{31} > (\sigma_{12} + \sigma_{23})$ , рідина розтікається поверхнею твердого тіла. Це явище повного змочування твердого тіла. Крайовий кут  $\theta$  при цьому дорівнює 0. Рідина розтікається молекулярним шаром по поверхні.

Якщо ж виконується умова  $\sigma_{23} < (\sigma_{12} + \sigma_{31})$ , то спостерігається повне незмочування твердого тіла. Крайовий кут  $\theta$  при цьому дорівнює  $\pi$ . Рідина ніби відділяється від поверхні, торкаючись її тільки в одній точці.

Найчастіше спостерігається або часткове змочування  $0 < \theta < \pi/2$  (рис. 5), або часткове незмочування  $\pi/2 < \theta < \pi$  (рис. 6).

Контактний кут залежить від природи поверхні, її хімічного складу, шорсткості, а також від властивостей самої рідини. На гідрофільних поверхнях (які приваблюють воду) вода розтікається, тоді як на гідрофобних – збирається в краплі. Це явище широко використовується в біомедичних сенсорах, у

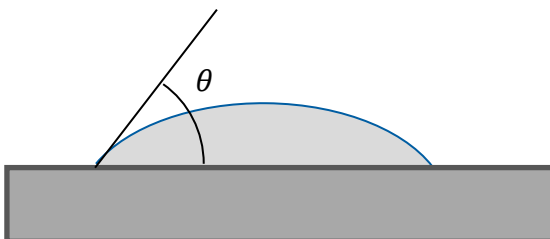


Рис. 4

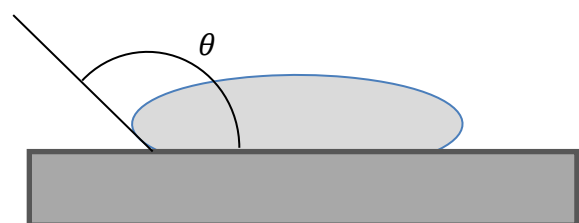


Рис. 5

виготовленні самоочисних матеріалів (ефект лотоса), в покриттях для одягу й скла.

Контроль змочування є критичним у таких галузях, як фармацевтика, нанотехнології, медицина. Наприклад, для інгаляторів чи капілярного введення лікарських засобів необхідно забезпечити оптимальне змочування. Тому контактний кут часто вимірюють за допомогою спеціальних пристроїв — тензіометрів, які визначають параметри змочування в різних умовах.

Розуміння цього процесу також дозволяє прогнозувати поведінку рідин у пористих середовищах, у ґрунті, тканинах та в мембранних матеріалах. Отже, краєвий кут є не просто геометричною характеристикою краплі, а важливим фізико-хімічним показником взаємодії рідина-поверхня.

### 1.5. Тиск під викривленою поверхнею рідини

Будь-яка фізична система прагне зайняти стан, у якому її потенційна енергія мінімальна. Викривлення поверхні рідини призводить до збільшення поверхні і, отже, до збільшення вільної енергії  $dF = \sigma dS$ , тобто поверхня рідини буде прагнути скоротити свою площу поверхні. Звідси випливає, що під викривленою поверхнею тиск буде іншим, ніж під плоскою поверхнею. Так, якщо під плоскою горизонтальною поверхнею рідини безпосередньо під поверхнею тиск дорівнюватиме атмосферному тиску  $p_0$  (рис. 6.a), то під випуклою поверхнею тиск буде більшим –  $p_0 + \Delta p$  (рис. 6.b), а під увігнутою поверхнею тиск буде меншим –  $p_0 - \Delta p$  (мал. 6.c).

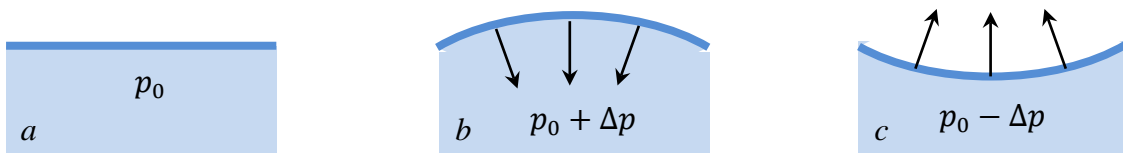


Рис. 6. Тиск під плоскою (a), опуклою (b) і увігнутою поверхнею рідини.

Додатковий тиск, спричинений викривленням поверхні, називається лапласовим тиском. Додатковий тиск розраховується за формулою Лапласа:

$$\Delta p = \sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

де  $\sigma$  – коефіцієнт поверхневого натягу,

$R_1, R_2$  – головні радіуси кривизни.

У випадку сферичної краплі обидва радіуси однакові, тому:

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{R}$$

Це означає, що чим менша крапля, тим більший у ній тиск. Така властивість пояснює, чому дрібні краплі швидше випаровуються, ніж великі. У легенях людини, наприклад, бульбашки альвеол мають дуже малий радіус, тому потребують спеціальної речовини – сурфактанту – для зменшення поверхневого натягу і, відповідно, тиску.

Лапласівський тиск має також велике значення в технологіях розпилення рідин, виробництві аерозолів, формуванні емульсій, стабілізації пін. У мікроскопічних масштабах цей тиск впливає на точність дозування та поведінку рідин у мікроканалах. Його враховують у сучасних пристроях для біомедичного аналізу, хімічних реакторах та у виробництві високоточних систем фільтрації.

### 1.6. Капілярні явища

Капілярні явища – це фізичні ефекти, які виникають, коли рідина контактує з вузькими трубками або порами, діаметр яких дуже малий. У таких умовах основну роль відіграють сили поверхневого натягу, змочування та адгезія. Якщо рідина змочує стінки капіляра, вона піднімається вгору (рис.7a); якщо не змочує – опускається (рис.7b).

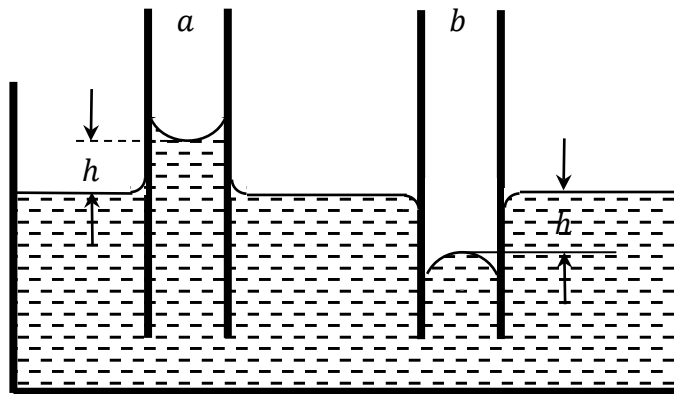


Рис. 7

Висота, на яку піднімається або опускається рідина, описується формулою Бореллі-Жюрена:

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g r},$$

де:

- $h$  – висота підняття (або опускання),
- $\sigma$  – коефіцієнт поверхневого натягу,

- $\theta$  – контактний кут,
- $\rho$  – густина рідини,
- $g$  – прискорення вільного падіння,
- $r$  – радіус капіляра.

Якщо діаметр капіляра малий і рідина повністю змочує стінки капіляра, то  $\theta = 0$  і  $\cos \theta = 1$ . У цьому випадку формула має вигляд:

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r}.$$

Ці явища мають критичне значення в природі. Саме завдяки капілярності вода піднімається по судинах рослин, зволожується ґрунт, працюють фільтри і губки. У біології – це основа мікроциркуляції крові та лімфи в тонких судинах. У техніці – використовуються при виготовленні текстилю, фарб, чернил, сенсорів. Явища визначають швидкість вбирання рідини у пористі матеріали, дію фільтрів, перенесення розчинених речовин. У сучасних технологіях вони враховуються при виготовленні медичних тестів, капілярних електрофорезів, мікрофлюїдних пристроїв. Тому вивчення та керування капілярністю є важливим завданням як для науки, так і для інженерії.

## Розділ 2. Методи визначення коефіцієнта поверхневого натягу

### 2.1. Метод капілярного підняття

Цей метод базується на явищі капілярного ефекту, тобто здатності рідини підніматися або опускатися в тонкій трубці – капілярі – внаслідок сил змочування і поверхневого натягу. Якщо рідина змочує стінки капіляра, то вона піднімається; якщо не змочує – опускається (рис. 7). Сила, яка викликає цей ефект, є проявом поверхневого натягу, а тому дає змогу його кількісно виміряти.

Установкою для експерименту є вертикально встановлений тонкий капіляр, який занурюється одним кінцем у рідину. За допомогою мікроскопа або шкали вимірюється висота підйому стовпчика рідини в трубці. У рівновазі сили поверхневого натягу зрівноважуються вагою піднятого стовпчика. За цим балансом виводиться формула:

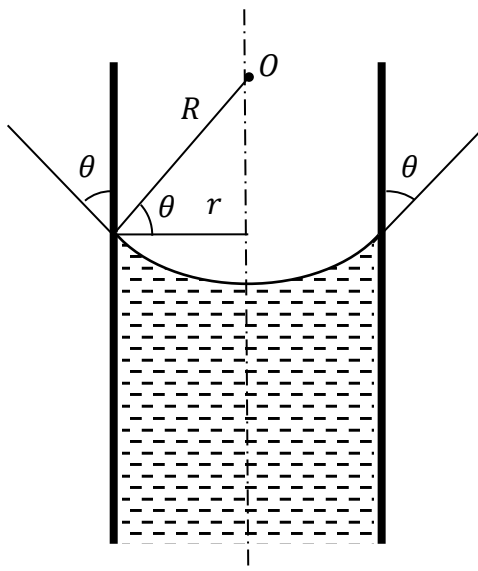


Рис. 8

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g r},$$

де:

- $\sigma$  – коефіцієнт поверхневого натягу;
- $\rho$  – густина рідини;
- $g$  – прискорення вільного падіння;
- $r$  – радіус капіляра;
- $h$  – висота підняття стовпчика рідини;
- $R$  – радіус кривизни;
- $\theta$  – крайовий кут.

В окремому випадку, коли рідина повністю змочує стінки капіляра, для якої  $\theta = 0$  і  $\cos \theta = 1$ , маємо:

$$h = 2\sigma / \rho g r.$$

Данній метод простий у реалізації, не потребує складного обладнання, дає змогу отримати точні результати при правильному калібруванні та стабільній температурі. Особливо ефективний для чистих рідин або розчинів із відомою густиною.

Серед недоліків – залежність результатів від точності вимірювання радіуса капіляра та висоти рідини, необхідність контролю температури й вібрацій. Для точних досліджень використовують капіляри з добре вимірним внутрішнім діаметром і автоматизовані пристрої.

Метод широко застосовується в навчальних лабораторіях, а також у дослідженнях властивостей водних і органічних розчинів, мастил, біологічних рідин.

### 2.2. Метод Дю Нуї (відрив кільця)

Цей метод запропонував французький вчений П'єр Дю Нуї у 1925 р. Він заснований на вимірюванні сили, необхідної для відриву

горизонтального кільця (зазвичай платинового) від поверхні рідини. Під час підйому кільця виникає сила опору через поверхневий натяг, і ця сила є пропорційною коефіцієнту поверхневого натягу.

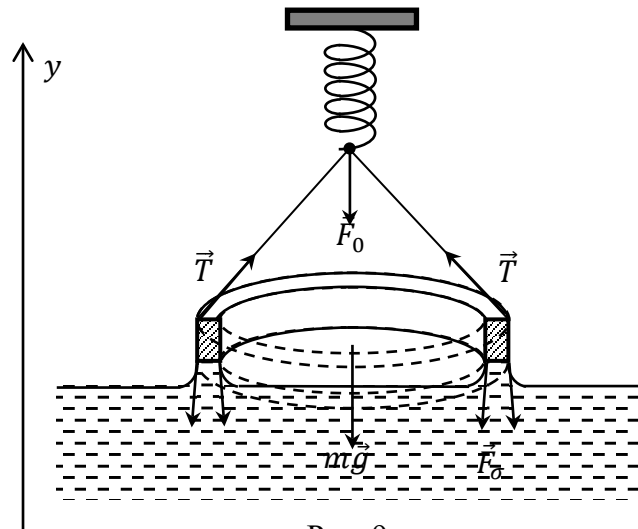


Рис. 9

Кільце занурюється в рідину так, щоб воно торкалося поверхні, потім повільно піднімається вертикально. За допомогою динамометра вимірюється максимальна сила перед відривом. Ця сила зв'язана з коефіцієнтом поверхневого натягу так:

$$\sigma = \frac{F_{\sigma}}{4\pi R}$$

де:

- $\sigma$  – поверхневий натяг,
- $F_{\sigma}$  – сила відриву кільця,
- $R$  – радіус кільця.

Цей метод є дуже чутливим і дозволяє досліджувати рідини з малими значеннями натягу. Він використовується в хімічній, косметичній, нафтовій галузях для оцінки якості розчинів ПАР, емульсій, мастильних матеріалів.

До недоліків можна віднести складність утримання постійної швидкості підйому, вплив забруднень кільця, необхідність стабільних температурних умов. Сучасні лабораторні установки усувають ці проблеми шляхом автоматизації процесу.

### 2.3. Метод відриву краплі (сталактитний)

Цей метод базується на аналізі моменту, коли крапля рідини, що поступово формується на виході з тонкої трубки, досягає критичної маси і відривається. Баланс між силами тяжіння і поверхневого натягу дозволяє розрахувати коефіцієнт поверхневого натягу.

Принцип простий: на кінці капіляра формується крапля, яка поступово зростає до певного об'єму. Як тільки її вага перевищує силу утримання через

натяг, вона відривається. Цей момент фіксується за допомогою відеозйомки або точного фотоелемента.

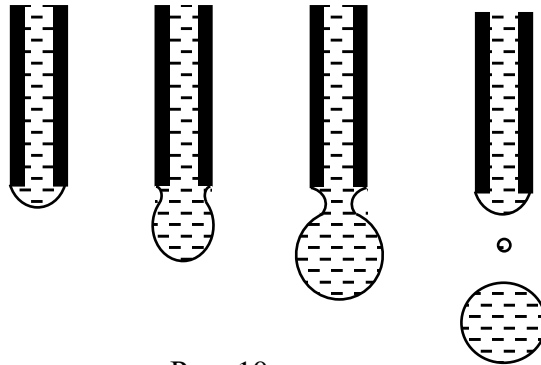


Рис. 10

Основна формула виглядає так:

$$\sigma = \frac{mg}{2\pi r}$$

де:

- $m$  – маса краплі;
- $g$  – прискорення вільного падіння;
- $r$  — радіус капіляра.

Якщо вимірюють об'єм, а не масу, можна записати:

$$\sigma = \frac{\rho V g}{2\pi r}$$

Цей метод є дуже доступним і легко реалізується в лабораторних умовах. Він підходить для вивчення впливу ПАР, температури, складу рідини на поверхневий натяг. Часто використовується в освіті, демонстраціях, початкових дослідженнях.

До переваг – простота, можливість багаторазових вимірювань, відсутність складного обладнання. Але точність залежить від правильного вимірювання об'єму або маси краплі, стабільності трубки, відсутності вібрацій.

## 2.4. Метод аналізу форми краплі (Drop Shape Analysis)

Цей метод базується на детальному аналізі геометрії краплі, що лежить на твердій поверхні. Він особливо ефективний для визначення поверхневого і міжфазного натягу в умовах змочування. Основна ідея — використати рівновагу сил на межі рідина-тверде тіло-повітря, аналізуючи форму профілю краплі.

За допомогою високоточних оптичних систем фотографується силует краплі. Потім програма аналізує її контур: висоту, ширину, контактний кут, радіус кривизни. За спеціальними рівняннями краплі в стані рівноваги (рівняння Йонга-Лапласа) розраховується коефіцієнт поверхневого натягу.

Одне з поширених рівнянь:

$$\sigma = (\Delta p R)/2$$

де  $\Delta p$  – перепад тиску через викривлену поверхню,  
 $R$  – радіус кривизни в нижній частині краплі.

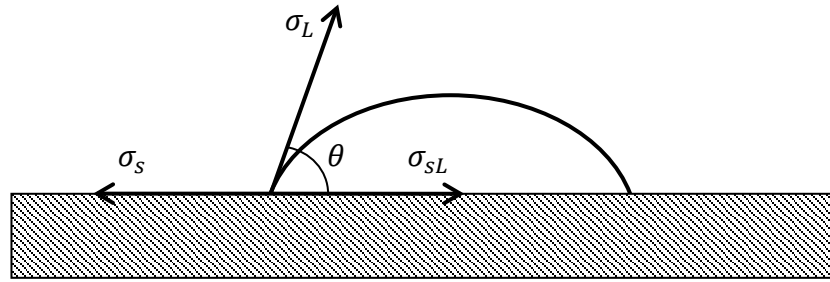


Рис 11.

На практиці найчастіше використовують програми, які апроксимують форму краплі за моделями (наприклад, метод Крафта, метод Башфорта-Адамса) і автоматично видають значення натягу.

Переваги методу:

- точний;
- дозволяє досліджувати краплі з різними контактними кутами;
- підходить для супергідрофобних чи гідрофільних поверхонь.

Недоліки – потреба у якісній камері, рівномірному освітленні, складність точного визначення профілю у нестабільних умовах. Метод особливо цінний у біомедичних дослідженнях, аналізі покриттів, контролі якості матеріалів.

## 2.5. Метод максимального тиску пухирця.

Метод максимального тиску пухирця (іноді його називають методом

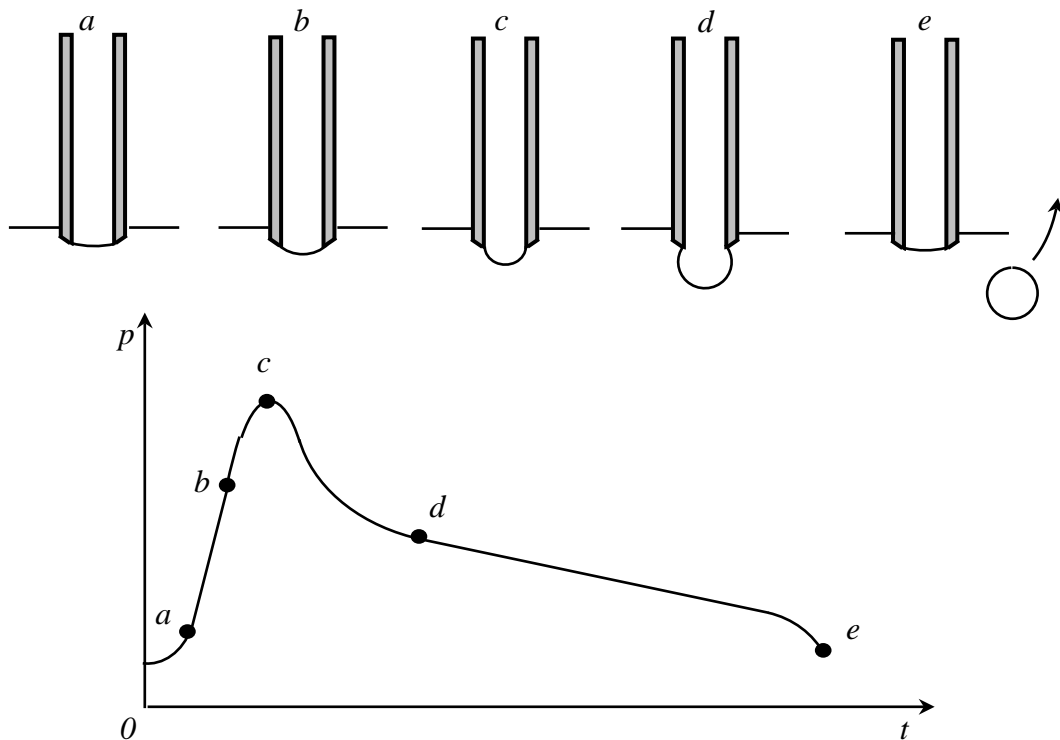


Рис.

Пашена або методом бульбашок) ґрунтується на вимірюванні надлишкового тиску, який необхідний для утворення пухирця на кінці тонкої капілярної трубки, зануреної в рідину. Коли через трубку повільно подається повітря, на її кінці поступово утворюється повітряна бульбашка. Цей пухирець утворює викривлену поверхню, і, відповідно до закону Лапласа, для її утримання необхідний певний надлишковий тиск.

Максимальний тиск, який виникає перед відривом пухирця, пропорційний коефіцієнту поверхневого натягу рідини. В момент, коли пухирець набуває напівсферичної форми, тиск досягає максимуму. Величина цього тиску вимірюється манометром або диференційним датчиком тиску, під'єднаним до системи.

Коефіцієнт поверхневого натягу обчислюється за формулою:

$$\sigma = \frac{(p_{max} - p_0)r}{2}$$

- $p_{max}$  – максимальний тиск у бульбашці;
- $p_0$  – тиск над поверхнею рідини;
- $r$  – радіус капіляра.

Цей метод особливо зручний для дослідження поверхневого натягу у високотемпературних або агресивних середовищах, оскільки контакт рідини з капіляром є мінімальним. Він також часто застосовується у біохімії та харчовій промисловості для контролю властивостей поверхнево-активних розчинів.

Серед переваг цього методу — висока чутливість і відносна простота апаратури. Проте існує і кілька недоліків: необхідність точної калібровки трубки, вплив в'язкості рідини, а також можливість помилок при визначенні моменту максимального тиску. Для підвищення точності вимірювань застосовуються спеціальні системи автоматичної фіксації піку тиску.

Цей метод рекомендується використовувати у тих випадках, коли стандартні методи (наприклад, капілярний чи кільцевий) не можуть забезпечити достатню точність або коли необхідне безконтактне визначення поверхневого натягу.

## 2.6. Метод падаючої краплі (пінметрія)

Метод падаючої краплі, або метод пінметрії, є одним із найдавніших і водночас наочних способів визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідини. Він базується на спостереженні за утворенням краплі на кінці капіляра або тонкої трубки, яка поступово зростає під дією гравітації, а потім відривається. Момент відриву пов'язаний із рівновагою між силами тяжіння краплі та силами поверхневого натягу.

Суть методу полягає в тому, що, знаючи масу або об'єм краплі в момент її відриву, а також характеристики капіляра, можна розрахувати

коефіцієнт поверхневого натягу. Зазвичай використовується краплинний дозатор або мікропіпетка, через яку дозовано подається рідина.

Коефіцієнт поверхневого натягу визначається за формулою:

$$\sigma = \frac{mg}{2\pi r},$$

де:

- $\sigma$  – коефіцієнт поверхневого натягу,
- $m$  – маса краплі на момент відриву,
- $g$  – прискорення вільного падіння,
- $r$  – радіус капіляра.

Якщо визначається не маса, а об'єм краплі, формула коригується з урахуванням густини рідини:

$$\sigma = \frac{\rho V g}{2\pi r},$$

Перевагами методу є його простота, можливість проведення в лабораторних умовах без складного обладнання, а також можливість візуального спостереження за процесом формування краплі. Він є корисним для навчальних демонстрацій та початкового аналізу властивостей рідини.

Однак метод має і свої обмеження. Наприклад, він менш точний у порівнянні з іншими сучасними способами через труднощі у фіксації моменту відриву краплі та можливі втрати рідини. Крім того, геометрія краплі не завжди є ідеальною, що вносить похибки у вимірювання.

Для підвищення точності результатів використовуються спеціальні дозатори з контролем тиску, високоточні ваги для зважування крапель, а також цифрові камери для автоматичної реєстрації моменту відриву.

Метод пінметрії є одним із базових і водночас фундаментальних у дослідженнях поверхневих явищ і широко застосовується в хімії, фармації, матеріалознавстві та біології.

## 2.7. Метод обертальної краплі

Метод обертальної краплі (англ. spinning drop method) використовується для точного визначення коефіцієнта поверхневого або міжфазного натягу, особливо в системах з дуже низькими значеннями цього параметра (наприклад, у дослідженнях емульсій, нафти, біологічних рідин). Він базується на принципі деформації краплі під дією відцентрових сил у полі обертання.

Суть методу полягає в наступному: всередину капілярної трубки, заповненої однією рідиною (зазвичай більш щільною), вводиться крапля другої рідини (з меншою густиною). Трубку розміщують горизонтально в спеціальному приладі – обертівій камері – та починають обертання навколо

її осі. Під дією відцентрової сили крапля деформується в тонкий циліндр. Ступінь розтягування краплі залежить від міжфазного натягу.

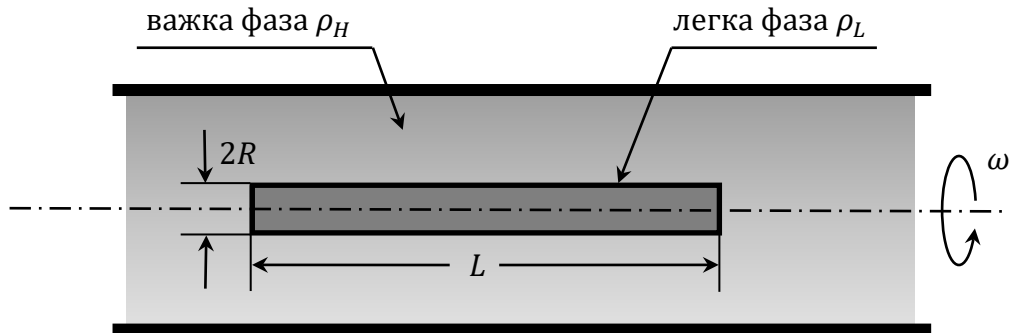


Рис. 13

Величина поверхневого (міжфазного) натягу розраховується за формулою фон Хельмгольца:

$$\sigma = \frac{\Delta\rho\omega^2 R^3}{4}$$

де:

- $\sigma$  – коефіцієнт поверхневого або міжфазного натягу,
- $\Delta\rho = (\rho_H - \rho_L)$  – різниця густин рідин,
- $\omega$  – кутова швидкість обертання (рад/с),
- $R$  – радіус обертальної краплі.

Метод дозволяє вимірювати значення натягу в діапазоні до  $10^{-6}$  Н/м з високою точністю. Він ідеально підходить для рідин, які утворюють стабільні інтерфейси, і широко використовується в нафтовій промисловості для дослідження властивостей нафтових емульсій, в біотехнологіях, у фармацевтичному виробництві.

Основні переваги методу:

- висока точність і чутливість;
- можливість роботи з малими об'ємами рідини;
- можливість визначення як поверхневого, так і міжфазного натягу.

До недоліків належать складність обладнання (необхідність спеціальної обертальної камери), чутливість до вібрацій, а також необхідність дуже точного контролю параметрів (густини, швидкості обертання, температури).

Незважаючи на складність, метод обертальної краплі є одним з найнадійніших у дослідженнях рідин з низьким поверхневим натягом і є стандартом у багатьох науково-дослідних лабораторіях.

## **Розділ 3. Порівняльний аналіз методів визначення коефіцієнта поверхневого натягу.**

Поверхневий натяг — це фундаментальна фізична характеристика, яка визначає поведінку рідин при взаємодії з іншими фазами: газами, твердими тілами або іншими рідинами. Його кількісне визначення є важливим не тільки для фундаментальних досліджень, але й у практичних сферах: медицині, фармацевтиці, харчовій промисловості, нафтовидобутку, нанотехнологіях, екології тощо. Існує багато методів визначення коефіцієнта поверхневого натягу. У цьому розділі буде проведено детальний порівняльний аналіз семи методів, описаних у попередньому розділі, на основі таких критеріїв: фізичний принцип, точність, складність, чутливість, витрати ресурсів, практичне застосування, сучасність і перспективність.

### **3.1. Узагальнені критерії оцінки методів.**

Для об'єктивного порівняння всі методи класифікуються за наступними характеристиками:

- Точність методу: чи дозволяє метод отримати високоточні результати в лабораторних або виробничих умовах?
- Складність реалізації: наскільки легко впровадити метод у навчальних, промислових або дослідницьких умовах?
- Обладнання: чи потребує метод спеціалізованого, дорогого або рідкісного обладнання?
- Чутливість до зовнішніх чинників: наскільки результати залежать від температури, вібрацій, вологості?
- Необхідний обсяг зразка: скільки рідини необхідно для одного вимірювання?
- Автоматизація процесу: чи можна метод реалізувати із застосуванням автоматизованих систем?
- Сфера застосування: де найчастіше використовують метод – у науці, промисловості, медицині, освіті?

Далі кожен метод аналізується за цими параметрами.

### **3.2. Метод капілярного підняття.**

Цей метод ґрунтується на капілярному ефекті – здатності рідини підніматися по тонкій трубці внаслідок сил змочування і поверхневого натягу. Хоча він є одним із найстаріших, його застосовують і сьогодні через простоту.

- Переваги: простота реалізації, наочність, низька вартість, можливість використання в навчальному процесі.
- Недоліки: середня точність, залежність від правильного вимірювання висоти стовпа рідини та радіуса капіляра, вплив температури й вібрацій.

- Застосування: переважно в навчальних лабораторіях, іноді в дослідницьких роботах для попереднього оцінювання властивостей розчинів.

Метод практичний для первинного скринінгу зразків або калібрування простих рідин.

### **3.3. Метод Дю Нуї (відрив кільця).**

Один із найбільш стандартизованих і науково визнаних методів. Заснований на динамометричному вимірюванні сили, що виникає при відриві кільця від поверхні рідини.

- Переваги: висока точність, можливість порівняння з результатами з літератури, широке розповсюдження.
- Недоліки: чутливість до геометрії кільця, потреба у дотриманні сталої швидкості підйому, необхідність ретельної калібровки.
- Застосування: наукові дослідження, фармацевтика, нафтохімія, харчова промисловість.

Метод широко підтримується промисловими стандартами (ASTM, ISO) і має програмне забезпечення для автоматизованої обробки результатів.

### **3.4. Метод сталактитного відриву краплі.**

Метод базується на визначенні сили тяжіння, що відриває краплю рідини з кінця капіляра. Є дуже простим, але менш точним способом.

- Переваги: простота, мінімальні вимоги до обладнання, можливість використання у польових умовах.
- Недоліки: значна похибка вимірювання, труднощі фіксації моменту відриву, залежність від геометрії краплі.
- Застосування: шкільні й базові університетські лабораторії, прості фізико-хімічні дослідження.

Може бути використаний для порівняння серійних зразків, але не підходить для високоточних вимірювань.

### **3.5. Метод аналізу форми краплі.**

Цей метод є високотехнологічним і ґрунтується на аналізі зображення краплі за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Застосовується як для дослідження змочування, так і для точного визначення поверхневого та міжфазного натягу.

- Переваги: висока точність, неінвазивність, автоматизація, підходить для мікроскопічних об'єктів.
- Недоліки: дорожняча обладнання, складність програмного аналізу, чутливість до оптичних умов.
- Застосування: нанотехнології, біомедицина, фармацевтика, дослідження поверхонь.

Цей метод є «золотим стандартом» для сучасних досліджень у високоточних лабораторіях.

### **3.6. Метод максимального тиску пухирця.**

Під час повільного продування газу через рідину вимірюється тиск, за якого відривається пухирець. За цим тиском розраховується коефіцієнт поверхневого натягу.

- Переваги: підходить для агресивних середовищ, термостійких умов, висока чутливість.
- Недоліки: необхідність точного контролю моменту відриву, складність апаратури.
- Застосування: контроль якості ПАР, біохімія, дослідження складних середовищ.

Метод забезпечує гарну відтворюваність при належній автоматизації вимірювального процесу.

### **3.7. Метод падаючої краплі (пінметрія).**

Один із найстаріших, але й найпростіших методів. Заснований на вимірюванні маси або об'єму краплі в момент її падіння.

- Переваги: простота, доступність, наочність
- Недоліки: низька точність, вплив нестабільності краплі, обмежене застосування.
- Застосування: освіта, демонстрації, аналіз чистих рідин.

Підходить для базових досліджень, але потребує вдосконалення для професійного використання.

### **3.8. Метод обертальної краплі.**

Застосовується для визначення наднизьких значень поверхневого або міжфазного натягу, особливо в емульсіях і біологічних системах.

- Переваги: надвисока точність, можливість дослідження мікрооб'ємів, надійність.
- Недоліки: дорога апаратура, складність калібрування, потреба у точному контролі густин і обертання.
- Застосування: нафтовидобуток, біотехнології, контроль стабільності емульсій.

Метод рекомендований у випадках, коли інші методи не забезпечують необхідної точності.

### 3.9. Порівняльна таблиця.

Метод	Точність	Складність	Обладнання	Автоматизація	Зразок	Чутливість
<i>Капілярне підняття</i>	Середня	Низька	Проста	Низька	Малий	Висока
<i>Відрив кільця (Дю Нуї)</i>	Висока	Середня	Середня	Середня	Середній	Помірна
<i>Відрив краплі (сталактит)</i>	Середня	Низька	Проста	Низька	Малий	Висока
<i>Аналіз форми краплі</i>	Дуже висока	Висока	Складна	Висока	Дуже малий	Низька
<i>Тиск пухирця</i>	Висока	Середня	Складна	Середня	Малий	Середня
<i>Падаюча крапля(пінметрія)</i>	Низька	Низька	Проста	Низька	Малий	Висока
<i>Обертальна крапля</i>	Дуже висока	Висока	Дуже складна	Висока	Дуже малий	Низька

### 3.10. Висновки до розділу.

У процесі аналізу виявлено, що кожен метод має свій оптимальний діапазон застосування. Універсального методу не існує, тому вибір має ґрунтуватися на поставлених задачах, доступному обладнанні та вимогах до точності. Для фундаментальних досліджень ідеально підходять методи аналізу форми краплі та обертальної краплі. Для навчання — капілярний підйом або пінметрія. У промисловості перевага надається методу Дю Нуї та тиску пухирця. Вибір методу — це компроміс між зручністю, вартістю, точністю та умовами експерименту.

### Висновки

У процесі виконання дипломної роботи було здійснено всебічне теоретичне й практичне вивчення природи поверхневого натягу рідини, а також методів його кількісного визначення. Поверхневий натяг є одним із ключових фізико-хімічних параметрів, який визначає взаємодію рідини з іншими фазами — газоподібними, твердими чи рідинними. Явище поверхневого натягу впливає на широкий спектр природних і технологічних процесів: від капілярного транспорту в рослинах до стабільності емульсій у харчовій та нафтовій промисловості, від змочування в медицині до мікрофлюїдних систем у нанотехнологіях.

У першому розділі було розглянуто теоретичні основи поверхневого натягу. Зокрема, було детально описано молекулярну природу цього явища, сили, що діють на межі рідинної поверхні, поняття поверхневої енергії, краєвого кута, змочування та впливу викривлення поверхні. Окрему увагу

приділено капілярним ефектам, які є прямим проявом поверхневого натягу і мають критичне значення в біофізичних системах, зокрема у транспорті рідин у клітинах і тканинах.

Другий розділ був присвячений опису методів визначення коефіцієнта поверхневого натягу. Було представлено як класичні, так і сучасні підходи: метод капілярного підняття, метод Дю Нуї (відрив кільця), метод сталактитного відриву краплі, аналіз форми краплі, метод максимального тиску пухирця, метод падаючої краплі (пінметрія) та метод обертальної краплі. Кожен із методів має власну фізичну основу, діапазон точності, вимоги до обладнання та специфіку реалізації. Особливої уваги заслуговують новітні методики, які дозволяють досліджувати надмалі об'єми рідини або працювати з наднизькими значеннями міжфазного натягу.

У третьому розділі проведено розгорнутий порівняльний аналіз розглянутих методів. Визначено переваги й обмеження кожного підходу за ключовими критеріями: точність, складність, необхідний обсяг зразка, чутливість до зовнішніх чинників, можливість автоматизації та сфера застосування. Було встановлено, що універсального методу не існує, і вибір залежить від конкретних умов експерименту. Наприклад, у лабораторних умовах із простим обладнанням доцільно використовувати метод капілярного підняття або метод пінметрії. У високоточних дослідженнях перевага надається аналізу форми краплі або методу обертальної краплі. У промисловості, де важлива швидкість і надійність, поширеними є метод Дю Нуї та метод максимального тиску пухирця.

**Отже, у результаті виконання дипломної роботи:**

- Розкрито фізичну сутність явища поверхневого натягу та пов'язаних із ним ефектів.
- Описано сім основних методів визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідини з детальним поясненням їхньої теоретичної основи, алгоритму реалізації та практичних переваг.
- Проведено критичне порівняння методів за широким спектром параметрів, що дозволяє обґрунтовано обирати відповідний метод залежно від мети дослідження.
- Підкреслено, що сучасні вимоги до точності, швидкості та масштабованості досліджень потребують використання як класичних, так і інноваційних методів, включно з автоматизованими та оптико-цифровими системами.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання поданого аналізу як орієнтиру для вибору відповідної методики в навчальному процесі, дослідницькій або виробничій діяльності. Усе це підтверджує, що дослідження поверхневого натягу рідини не лише зберігає свою актуальність, а й розширює горизонти в новітніх міждисциплінарних галузях знань.

### Список використаної літератури

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики. Том 1. Механіка. Молекулярна фізика. – К.: Техніка, 1999.
2. Бушок Г.Ф., Вегнер Є.Ф. Курс фізики. – К.: Вища шк., 2003.
3. Пастушенко С.М., Підченко Ю.П. Вища математика. Довідник з математики. – К.: Діал, 2003.
4. Landau L.D., Lifshitz E.M. Fluid mechanics. – Oxford.: Pergamon Press, 1986.
5. Atkins P., De Paula J. Physical Chemistry. – Oxford University Press, 2014.
6. Adamson A. Physical Chemistry of Surfaces. – Wiley-Interscience, 1997.
7. Rowlinson J.S., Widom B. Molecular Theory of Capillarity. – Clarendon Press, 1982.
8. Vargaftik N.B. Surface Tension of Water. – J. Phys. Chem. Ref. Data, 1983.
9. Batchelor G.K. An Introduction to Fluid Dynamics. – Cambridge Univ. Press, 2000.
10. Hauner I.M., Deblais A., Beattie J.K., Bonn D. The Dynamic Surface Tension of Water. – *J Phys Chem Lett.* 2017 (7). doi: 10.1021/acs.jpcclett.7b00267
11. Drelich J., Fang C., White C.L. Measurement of Interfacial Tension and Contact Angles at Fluid Interfaces. — *J. Colloid Interface Sci.*, 1996.
12. Churaev N.V. Surface Phenomena in Liquids and Solids. — Gordon and Breach, 1995.
13. Fowkes F.M. Additivity of Interfacial Energies. II. The Equation of State Approach.— *Industrial & Engineering Chemistry*, 1964.
14. de Gennes P.G., Brochard-Wyart F., Quéré D. Capillarity and Wetting Phenomena: Drops, Bubbles, Pearls, Waves. — Springer, 2004.
15. Neumann A.W., David R. Applied Surface Thermodynamics. — CRC Press, 2010.
16. Wu S. Calculation of Interfacial Tension in Polar Systems. — *J. Polymer Science Part C: Polymer Symposia*, 1971.