

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу  
Факультет автоматизації та енергетики  
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного  
менеджменту

Вістовський Віталій Вікторович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 532.6.08

(індекс)

## МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Тема: Розроблення методу визначення поверхневого натягу рідин  
за контуром притиснутого пухирця

(назва роботи)

152 Метрологія та вимірювальна техніка

(назва освітньої програми)

(шифр і назва спеціальності)

Вістовський В.В.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Біліщук Віктор Борисович , к.т.н., доцент

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

Допущено до захисту  
Завідувач кафедри ІВТЕМ

Доц. \_\_\_\_\_ *В.С. Цих*  
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

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

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

м. Івано-Франківськ – 2025 рік

**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 **152 Метрологія та вимірювальна техніка**  
(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри ІВТЕМ \_\_\_\_\_

**В.С. Цих**

«\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 року

**ЗАВДАННЯ**

**НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

**\_ Вістовський Віталій Вікторович**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи **Розроблення методу визначення поверхневого натягу рідин за контуром притиснутого пухирця**

Керівник роботи **Біліщук Віктор Борисович, к.т.н., доцент**

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від "05" 12. 2025 року № 752/7

2. Термін подання студентом роботи **"18" 12. 2025 року**

3. Вихідні дані до роботи: діапазон вимірювання поверхневого натягу від 10 мН/м до 100 мН/м; діапазон температур 5–95 С<sup>0</sup>; мінімальний об'єм досліджуваної рідини – 50 мл; рідини прозорі.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Аналіз існуючих методів визначення поверхневого натягу рідин. Теоретичне обґрунтування вибраного методу контролю. Розробка функціональної схеми установки. Розробка методики контролю. Метрологічний аналіз розробки

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

Теорія методу (А2); Функціональна структурна схема установки (А2); ). Складальне креслення установки (А1); Метрологічне забезпечення установки. (А1)

## 6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд методів і засобів контролю		
2.	Теоретичне обґрунтування методу контролю		
3.	Розробка функціональної схеми установки.		
4	Розробка методики контролю		
5	Метрологічний аналіз		
6.	Оформлення роботи.		

Студент \_\_\_\_\_.. Вістовський В.В.  
( підпис ) (прізвище та ініціали)

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

## РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 74 с., 10 рис., 2 табл., 2 додатки, 31 джерела, 8 аркушів креслень.

Об'єкт дослідження – рідини та розчини поверхнево-активних речовин.

Мета роботи – розробка пристрою для проведення вимірювання поверхневого натягу на межі розділу фаз рідина - повітря.

Метод дослідження - математичне моделювання процесу формування притиснутого пухирця у досліджуваних рідинах.

Зроблено аналіз відомих методів визначення поверхневого натягу і обрано метод притиснутого пухирця, як такий, що може дати інформацію про поверхневий натяг протягом довгого періоду часу.

Описано розроблений прилад для контролю поверхневого натягу на межі контакту рідин і розчинів поверхнево-активних речовин з повітрям. Розроблено функціональну схему і складальне креслення пристрою та методику проведення за його допомогою вимірювань поверхневого натягу.

Проведено метрологічну оцінку використаної методики та розробленого приладу і визначено його сумарну похибку.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ПОВЕРХНЕВИЙ НАТЯГ, МЕТОД ПРИТИСНУТОГО ПУХИРЦЯ, ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНІ РЕЧОВИНИ, ПРИЛАД, ВИМІРЮВАННЯ.

## ABSTRACT

Magister's work: 74 pages, 10 figures, 2 tables, 4 applications, 31 sources, 8 sheets of drawings.

Object of study - liquids and solutions of surfactants.

Purpose - to develop a device for measuring the surface tension at the interface liquid - air.

The method of study - mathematical modeling of bubble formation pressed into the test liquid.

The analysis of known methods for the determination of surface tension and selected method of pressed bubble chosen is the one that can give information about the surface tension for a long period of time.

Describe the device is designed to determine surface tension on the border of the contact of liquids and solutions of surfactants with air. Designed by the functional schematic and assembly drawing of device and method of using measurements of its surface tension.

Conducted a metrological evaluation of methods which used and the developed device

**KEYWORDS: SURFACE TENSION, SQUEEZE THE BUBBLE METHOD, SURFACTANTS, DEVICE MEASUREMENTS.**

## ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Аналіз відомих методів визначення поверхневого натягу на межах розділу фаз.....	9
1.1 Аналіз відомих методів визначення поверхневого натягу.....	9
1.2 Порівняльний аналіз методів вимірювання поверхневого натягу рідин.....	20
1.3 Постановка задачі на магістерську роботу.....	21
2 Розробка удосконалених методик вимірювання поверхневого натягу на основі результатів вимірювання геометричних параметрів притиснутого пухирця.....	23
2.1 Утворення пухирця у процесі вимірювання поверхневого натягу методом притиснутого пухирця.....	23
2.2 Розробка методики розрахунку параметрів притиснутого пухирця і аналіз отриманих результатів.....	26
2.3 Проходження променів світла через притиснутий пухирець при вимірюванні поверхневого натягу.....	36
2.4 Розробка удосконалених методик вимірювання поверхневого натягу на основі інтерпретації геометричних параметрів притиснутого пухирця...38	
2.4.1 Визначення поверхневого натягу на основі значень радіусів кривизни поверхні притиснутого пухирця.....	39
2.5 Розробка алгоритму обробки зображення притиснутого пухирця..42	
2.5.1 Виділення необхідного фрагмента та фільтрація зображення притиснутого пухирця.....	43
2.5.2 Підвищення контрасту та виділення контуру притиснутого пухирця.....	44
2.5.3 Бінаризація зображення притиснутого пухирця.....	47

2.6 Розробка функціональної схеми приладу для вимірювання поверхневого натягу методом притиснутого пухирця.....	50
2.7 Розробка конструкції приладу для вимірювання поверхневого натягу методом притиснутого пухирця.....	52
2.8 Розробка методики проведення вимірювання поверхневого натягу за допомогою розроблюваного приладу.....	54
3 Метрологічний аналіз відомих удосконалених методик та розробленого приладу для вимірювання поверхневого натягу методом притиснутого пухирця.....	57
3.1 Аналіз інструментальних та сумарних похибок приладу, який реалізує запропонований метод вимірювання поверхневого натягу.....	57
3.2 Визначення методичної похибки вимірювання поверхневого натягу методом притиснутого пухирця.....	63
3.3 Похибка вимірювання поверхневого натягу на основі визначення радіусів кривизни.....	66
3.4 Розробка методики звіряння похибки приладу ВПНП-1.....	68
Висновки.....	69
Перелік літературних джерел.....	70
Додатки	

## ВСТУП

На теперішній час поверхнево-активні речовини (ПАР) використовуються майже у всіх галузях промисловості, сільському господарстві, побуті, поліграфії, медицині тощо. Основною їхньою властивістю є здатність впливати на процес взаємодії контактуючих фаз. Це обумовлюється використанням ПАР як миючих засобів, як допоміжних речовин в технологічних процесах флотації руд, буріння свердловин, нафтогазовидобутку, а також при виробництві штучних волокон, каучуку, пластмас, в целюлозно-паперовій та інших галузях. Але в той же час широке використання і стрімке збільшення об'ємів виробництва ПАР та постійне поповнення їх асортименту приводить до забруднення навколишнього середовища (гірських порід, річок, ґрунтів), тому ця група речовин серед забруднювачів довкілля займає одне з перших місць. При цьому слід враховувати, що на переважній більшості промислових підприємств і комунальних господарств відсутні засоби очищення стічних вод від вмісту ПАР. Враховуючи високу шкідливість ПАР для здоров'я людей слід їх вчасно виявляти і постійно контролювати наявність, особливо у водоймах.

Основним проявом застосування розчинів ПАР як в позитивному, так і в негативному впливах є зменшення поверхневого натягу (ПН) на межі розділу фаз. Причому характер зміни ПН від моменту утворення поверхні розділу фаз настання рівноважного стану має виражений динамічний характер і визначається якісними і кількісними показниками, відповідно, хімічним складом і концентрацією ПАР у розчинах. Все це обумовлює необхідність дослідження динамічного ПН (залежності ПН на межі розділу фаз від часу її існування) і, відповідно, контролю концентрації ПАР у розчинах при їх технологічному застосуванні та оцінці негативного впливу на довкілля.

На даний час відома велика кількість методів і приладів для визначення ПН, кожен з яких доцільно використовувати для конкретних рідин і при певних

умовах. В Україні дослідженням поверхневого натягу займаються науковці школи проф. Кісіля І.С. в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти й газу, Донецькому державному медичному університеті, Науковому центрі технічної екології, м. Донецьк, Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів, Вінницькому національному технічному університеті.

Із великої кількості відомих методів визначення ПН реалізовано в приладах, які випускають серійно, тільки декілька. Зокрема метод притиснутого пухирця використовувався лиш в дослідних експериментальних установках і не був практично реалізований та повністю досліджений на даний час. Для його реалізації не потрібно складних конструкторських та технологічних розробок, тому вдосконаленню цього методу призначена ця робота.

Із сказаного вище видно, що питання розроблення установки для визначення ПН рідин є досить актуальним на даний час.

Об'єктом дослідження є фізико-хімічний процес міжфазової взаємодії в системі рідина-газ.

Предметом дослідження є спосіб визначення поверхневого натягу рідин.

Наукову новизна магістерської роботи полягає у розробленні установки та методики визначення поверхневого натягу рідин за методом притиснутого пухирця.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено лабораторну установку для визначення поверхневого натягу рідин за методом притиснутого пухирця та методику оцінювання характеристик невизначеності результатів вимірювання параметрів у розробленій установці.

# 1 АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ НА МЕЖАХ РОЗДІЛУ ФАЗ

## 1.1 Аналіз відомих методів визначення поверхневого натягу

Існує багато методів і засобів контролю поверхневого натягу, які відрізняються діапазоном вимірювального часу існування міжфазної поверхні (так званого часу життя), швидкістю та ступінню деформації поверхні в процесі вимірювань, точністю та відтворюваністю результатів.

За суттю методи, що використовуються для вимірювання поверхневого натягу рідин, можна класифікувати таким чином:

- 1) статичні;
- 2) методи, що базуються на вимірюванні екстремальних значень параметрів;
- 3) методи, що використовують поле обертання;
- 4) за методикою розрахунку.

До статичних методів відносяться методи підняття в капілярі, висячої та лежачої краплі, меніска біля плоскої стінки, пластинки Вільгельмі [1, 7, 24]. Суть цих методів полягає у вимірюванні параметрів профілів менісків із зафіксованою конфігурацією. Такими параметрами є певні геометричні величини (діаметр в певній площині, висота, площа профілів менісків, об'єм меніска та ін.), які зв'язані з координатами точок, які лежать на лінії межі профілю. Проте, за наявності механічної рівноваги, у системі можуть бути відсутніми термічна і дифузійна рівноваги, які характеризуються значно більшим часом релаксації, ніж механічна рівновага (яка встановлюється зі швидкістю звуку [1]). У цьому випадку, якщо час спостереження за меніском вибирається дуже малим (отримання зображення за допомогою телевізійних засобів контролю), форму меніска також можна вважати фіксованою.

Метод підняття в капілярі. Метод заснований на капілярних ефектах, тобто здатності рідини втягуватися чи виштовхуватися з капіляра [1]. Змочувальна рідина піднімається в капілярі на висоту

$$h = 2\sigma \cdot \cos \theta / \rho g r_k, \quad (1.1)$$

де  $\theta$  — крайовий кут змочування (ККЗ);  $\rho$  — густина рідини;  $g$  — прискорення сили тяжіння;  $r_k$  — радіус капіляра.

Для визначення рівня рідини в чашці необхідне особливе пристосування, але можна обійтися двома капілярами різних радіусів. Тоді поверхневий натяг визначається за формулою

$$\sigma = \rho_{ж} g (r_1^{-1} - r_2^{-1}) (h_1 - h_2) / 2 \cos \theta. \quad (1.2)$$

Для вимірювання рівня рідини в капілярах раціонально застосовувати катетометр. Посудина, у якій знаходиться рідина, повинна бути такого діаметра, щоб капіляр був віддалений від стінок на 30 – 40 мм. Капіляр повинен бути круглим та перевіреним на однорідність по всій довжині за допомогою ртуті. Добре застосовувати так звані капіляри для термометрів.

Практично метод здійснюється вимірюванням різниці рівнів у двох капілярах різного внутрішнього діаметра, занурених у посудину з досліджуваною рідиною.

Такий метод придатний для вимірювання міжфазного натягу на межі двох рідин. В якості приладу можна використовувати віскозиметр Освальда. На капілярі роблять відмітку, на яку встановлюється міжфазна границя, і від неї відзначають висоту обмеженої рідини в одному коліні і води в іншому. Для розрахунку міжфазного натягу використовується формула

$$\sigma = (h_1 \rho_1 - h_2 \rho_2) g r / 2 \cos \theta, \quad (1.3)$$

де  $h_1$  і  $\rho_1$  — висота підняття і густина органічної фази;  $h_2$  і  $\rho_2$  — висота, підняття і густина водяної фази.

Варто тільки враховувати, що верхній рівень обох фаз повинен знаходитися в широких частинах трубок.

На відміну від індивідуальних малополярних рідин, у яких кут  $\theta=0$  та

$\cos\theta = 1$ , при роботі з розчинами ПАР чи рідкими ПАР не завжди легко помітити момент, коли змочування стінки капіляра стає неповним. У таких випадках необхідно незалежними методами визначати кут  $\theta$ , що вимагає такої ж витрати праці, як безпосереднє визначення поверхневого натягу. Суттєвою вадою методу капілярного підняття є те, що після кожного вимірювання треба робити очищення капіляру від ПАР кількома процедурами, що значні знижує продуктивність процесу вимірювання.

Метод Вільгельмі. В цьому методі використовують тонку пластинку із добре змочуваного матеріалу (для якого ККЗ  $\theta=0$ ). У якості такого матеріалу найчастіше беруть платину із-за її хімічної інертності, але можна використовувати скло та ін. Цю пластинку прикріплюють на нерозтяжній підвісці до важеля торсійної ваги або до точної електронної, і опускають до торкання з поверхнею досліджуваної рідини, що знаходиться в широкій посудині для зменшення впливу зміни рівня рідини та меніска біля стінок посудини. При розрахунку ПН в цьому методі прирівнюють сили поверхневого натягу, яка діє по периметру перерізу пластинки, з силою Архімед а, яка пропорційна об'ємові частини пластинки, яка знаходиться в рідині. Обчислюють ПН за формулою

$$\sigma = \frac{W + \rho l b h}{2(h + b) \cos \theta}, \quad (1.4)$$

де  $W$  – покази ваги;  $\rho$  – густина рідини;  $l$ , – довжина зануреної частини пластини;  $b$  – ширина пластини;  $h$  – товщина пластини.

Метод досить простий, але точність результатів визначення ПН залежить від змочуваності пластини рідиною, а також від хімічної чистоти пластини.

Методи лежачої та висячої краплі.

В основі цих методів лежать визначення форми краплі, що лежить на змочуваній пластинці чи висить під якою-небудь поверхнею, може висіти і на кінці капіляра, з якого її витискують.

За допомогою оптичних вимірювальних засобів визначають розміри

лежачої висячої краплі в різних сагітальних перерізах, за якими обчислюють ПН. Раніше для визначення параметрів краплі її фотографували чи проектували на екран, тепер із розвитком оптоелектронної техніки це вже практично не використовують

У методі висячої краплі вимірюють екваторіальний діаметр краплі  $d_k$ , визначають висоту  $H$  від екваторіального діаметру до вершини, і обчислюють ПН за формулою

$$\sigma = \frac{(\rho - \rho_r) \cdot d_k g}{H}, \quad (1.5)$$

де  $\rho$  – густина рідини;  $\rho_r$  — густина газу.

У роботі [24] наведені таблиці і методи розрахунку поверхневого натягу за формою краплі.

Достоїнством вказаних методів є в тому, що вони безконтактні, тому їх можна застосовувати для визначення ПН при високих температурах, зокрема розплавлених металів. Недоліком цих методів є те, важко встановити точну форму крапель, що впливає на визначення  $H$  і, відповідно, ПН. Автоматизація процесу визначення ПН, навіть з використанням ПК, є непростюю.

Методи другої групи, на відміну від статичних методів, вимагають, щоб форма меніска у ході дослідження змінювалася. При цьому одна з величин, що характеризує досліджуваний меніск, повинна пройти через екстремум. Це методи: максимальної висоти лежачої краплі, максимального тиску бульбашки, витягування циліндра, кульки, конуса, відриву кільця, пластинки, сталагмометричний, барботажний, лежачої та висячої краплі у електростатичному полі [3]. Розглянемо найбільш поширені з них.

Метод максимального тиску в газовому пухирці (МТГП). Суть його полягає в тому, що через калібрований капіляр, опущений у досліджувану рідину, видують пухирці повітря. Зі збільшенням тиску пухирець росте до тих пір, поки внутрішній тиск  $P$  у пухирці досягне максимуму. Після цього пухирець відривається від капіляра.

Значення ПН обчислюють із формули

$$P = gh_k\rho + 2\sigma/r_k, \quad (1.6)$$

де  $\sigma$  – поверхневий натяг;  $r_k$  – радіус капіляра;  $h_k$  – глибина занурення капіляра в рідину;  $g$  – прискорення земного тяжіння.

Метод МТГП можна автоматизувати, добре застосовувати для визначення динамічного ПН.

Недоліком методу є складність установки для вимірювання максимуму  $P$ , також необхідність процедур очищення капіляра.

Метод відриву кільця, сережки, пластинки (метод Дю Нуї).

В основі методу лежить визначення сили, необхідної для відриву рідини, що змочила кільце, від поверхні рідини. Сила відриву визначається

$$W = 2\pi(r_{\text{вн}} + r_{\text{зовн}})\sigma \quad \text{або} \quad W = 4\pi r_{\text{сер}}\sigma, \quad (1.7)$$

де  $r_{\text{вн}}$ ,  $r_{\text{зовн}}$  і  $r_{\text{сер}}$  - внутрішній, зовнішній і середній радіуси кільця.

Поверхневий натяг досліджуваної рідини порівнюються з відомими поверхневим натягом і силою відриву досліджуваної рідини. Розрахунок тоді проводиться за формулою

$$\sigma_x = \sigma_{\text{ст}} W_x / W_{\text{ст}}, \quad (1.8)$$

де  $W_{\text{ст}}$  і  $W_x$  - сила відриву кільця від стандартної і випробуваної рідини;  $\sigma_{\text{ст}}$  – поверхневий натяг стандартної рідини.

Для визначення сили відривання кільця застосовують такі ж засоби, як в методі Вільгельмі.

Випускаються сучасні автоматизовані промислові тензіометри за методом відриву кільця.

Метод простий і надійний, дозволяє визначати як ПН, так і міжфазний натяг.

Недолік методу аналогічний як в методі Вільгельмі.

Сталагмометричний метод (метод Харкінса). В основі методу лежить визначення ваги краплі, що відривається від капіляра під дією сили тяжіння при

витискуванні дозуючим пристроєм.

У момент відривання краплі її вага і  $P_k$  буде рівна силі ПН, що діє по лінії кола відриву крапель. Тоді ПН визначається із формули

$$P_k = 2 \cdot \pi \cdot r_k \cdot \sigma / k_n, \quad (1.9)$$

де  $r_k$  – радіус капіляра,  $\sigma$  – поверхневий натяг;  $k_n$  – поправочний коефіцієнт, що враховує той факт, що відривання краплі насправді відбувається не від самого капіляра, а нижче по звуженому місцю, яке називають шийкою краплі.

Вагу краплі  $P_k$  визначають, виходячи із об'єму витисненої рідини дозуючим пристроєм та кількості крапель, що при цьому утворились.

Метод простий і використовується коли потрібно знати орієнтовне значення ПН.

Недоліком методу є недостатня точність вимірювання, неможливість визначення динамічного ПН, а також необхідність процедур очищення капіляра після кожного вимірювання ПН.

Методи, що використовують поле обертання. Найчастіше з них використовується метод обертової краплі [4]. В цьому методі в закриту трубку з досліджуваною рідиною вводять пухирець повітря. Якщо трубку з цією системою рідина-повітря обертати з певною швидкістю, то внаслідок відцентрової сили важча рідина буде притискуватись до стінок трубки, а газовий пухирець на осі обертання витягнута овальну форму. Швидкість обертання треба встановлювати такою, щоб довжина пухирця була більшою за діаметр в 4 рази. Тоді ПН визначається за формулою [32]

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

де  $\Delta\rho$  – різниця густин рідини і газу;  $\omega$  – швидкість обертання трубки;

$R$  – радіус пухирця.

Цей метод добре підходить і для визначення міжфазного натягу двох не змішуваних рідин. Тоді крапля легшої рідини буде витягнута на осі.

Метод точний, але складний в апаратному плані, крім того, важча рідина повинна бути прозорою.

За методикою розрахунку виділяють розрахунок: поверхневого натягу за парохором; суміші рідин, в залежності від температури і тиску; за коефіцієнтом ізотермічного стиснення; за коефіцієнтом заломлення; за густиною і тиском пари; методами Сагдена, Рао-Рао, Митра-Саньяла, Попеля, Павлова і Єсіна [6]. Ці методи, в основному, застосовуються до органічних рідин. Середня похибка цих методів досить велика - від 2 % до 40,5 %. Так, наприклад, похибка методу розрахунку за коефіцієнтом заломлення для полярних органічних сполук складає 6,7 %, для неполярних - 5,7 %, похибка методу розрахунку за густиною і тиском пари для асоційованих органічних сполук лежить в межах 29,4 % [6].

При визначенні ПН вимірюють різні параметри капілярних поверхонь: фізи

Визначають такі геометричні параметри: радіус кривизни, висоту краплі, екваторіальний діаметр, діаметр „шийки“, відстань від екватора до вершини, координати точок.

До фізичних відносять тиск, силу відривання діючих інструментів та ін..

Капілярні поверхні, за якими визначають ПН, можна поділяють на дві групи: згорнуті та розгорнуті [15]. Якщо капілярна поверхня перетинає вісь обертання – це згорнута (крапля, пухирець), якщо ж не перетинає – розгорнута.

Методи, основані на вивченні профілів менісків, поділяються на статичні; методи, що базуються на вимірюванні екстремальних значень; та такі, що використовують поле обертання [16].

В статичних поверхнях знаходиться в рівновазі й нерухома в момент вимірювання. До статичних відносяться методи підняття в капілярі, висячої та лежачої краплі, меніска біля плоскої стінки, пластинки Вільгельмі. Так, метод капілярного підняття використовується лише в тих випадках, коли трубка добре змочується, тобто контактний кут рівний нулю. В більшості методик через складність точного визначення рівня рідини в трубці використовується диференціальний метод, в якому вимірюється різниця положень менісків в двох трубках з різним внутрішнім радіусом [15].

В основі методів лежачої та висячої краплі лежить визначення форми краплі, яка лежить на пластинці або підвішена до кінця капіляра. Ці методи особливо корисні при дослідженні поверхонь, що старіють, оскільки дозволяють досліджувати форми краплі у часі при сталому її об'ємі. Кінцева форма краплі є дійсно рівноважною, внаслідок чого отримується рівноважне значення поверхневого натягу. Похибка методів лежачої та висячої крапель згідно із [16] складає 0,15 %. Метод Вільгельмі полягає у вимірюванні зусилля втягування пластинки, яка підвішена до коромисла ваг та дотикається до рідини. При цьому сила, що втягує пластинку, врівноважується на вагах так, щоб положення пластинки не змінювалось після дотику з рідиною [15].

У методах, що базуються на вимірюванні екстремальних значень, поверхня поділу фаз, що визначається, руйнується або рухається. При цьому одна із величин, що характеризує досліджуваний меніск, повинна пройти через екстремум. До цих методів відносяться метод максимальної висоти лежачої краплі, максимального тиску бульбашки, витягування циліндра, шару, конуса, відриву кільця, пластинки, сталагмометричний, барботажний, лежачої та висячої краплі у електростатичному полі [3]. Як параметри, що аналізуються, можуть використовуватися не тільки величини, які безпосередньо належать меніскові, а і сила, що діє на тверде тіло, яке знаходиться у досліджуваній системі, або відстань від твердого тіла до флюїдних фаз, пов'язаних із параметрами власного меніска строгими співвідношеннями.

В методі максимальної висоти лежачої краплі параметром, що має екстремум, є висота краплі, що є функцією об'єму. Збільшення об'єму краплі здійснюється додаванням дуже малих краплин. Згідно з [16] похибка методу максимальної висоти лежачої краплі складає 0,1%.

Суть методу максимального тиску бульбашки полягає в тому, що через капіляр, опущений в досліджувану рідину, продувають бульбашки повітря чи пропускають краплі іншої рідини та вимірюють стрибок тиску при відриві бульбашки. Бульбашка відривається, коли тиск у ньому більший суми

гідростатичного тиску і тиску, створюваного поверхневим натягом відповідно до формули Лапласа [15].

Методом витягування вертикального циліндра можна вимірювати значення поверхневого натягу із похибкою до 0,1 мН/м [16]. Аналогічну точність має метод витягування кулі [15]. Метод відриву кільця (метод Дю Нуї) має обмежене застосування. У випадку простих рідин він дає хороші результати, а для розчинів його використання обмежується через старіння поверхні. В основі методу лежить визначення сили, необхідної для відриву рідини, яка змочила кільце, від поверхні рідини.

Метод зважування чи вимірювання об'єму крапель полягає у визначенні ваги краплі, яка відривається від капіляра та утримується силами поверхневого натягу. У випадку простих рідин цей метод має достатню точність, однак при роботі з розчинами похибка може бути значною, оскільки відрив краплі від наконечника капіляра визначається гравітацією і не може бути уповільнений [4].

До методів, які використовують поле обертання, належать метод обертової краплі, метод стержня, що обертається [17]. Метод краплі, що обертається, розроблений для визначення дуже низьких міжфазних натягів у системі рідина-рідина. Цей метод придатний не для всіх рідин [18]: гладкий профіль краплі утворюється в тому випадку, коли хоча б одна із рідких фаз має достатньо високу в'язкість.

За методикою розрахунку виділяють розрахунок поверхневого натягу за парохором; суміші рідин, в залежності від температури і тиску; за коефіцієнтом ізотермічного стиснення; за коефіцієнтом заломлення; за густиною і тиском пари; методами Сагдена, Рао-Рао, Митра-Саньяла, Попеля, Павлова і Єсіна [6].

В даний час існує багато методів вимірювання ПН, але вони використовують різні методики з різним ступенем наближення відповідної математичної моделі, тому вони вимагають точного вимірювання відповідних параметрів для кожного методу і застосування обчислень на ПК.

Так, наприклад, метод Вільгельмі та капілярного підняття вимагає визначення крайового кута змочування, що потребує такі ж витрати праці, як безпосереднє визначення поверхневого натягу. Метод підрахунку крапель також трудомісткий: після кожного визначення в присутності поверхнево-активних речовин потрібне ретельне очищення капіляра. Недоліком описаних вище методів є невисока точність, невеликий діапазон та неавтоматизований процес вимірювання. Тому виникає потреба в інших високо ефективних методах вимірювання.

## 1.2 Порівняльний аналіз методів вимірювання поверхневого натягу рідин

У [20] вказано, що для порівняння вимірювальних пристроїв, вибору оптимальних структур або методів проектування необхідно мати міру, придатну для цих цілей - критерій ефективності.

Критерії, що оцінюють окремі сторони функціонування системи, є частковими [19]. З них можна виділити три групи: метрологічні, що збігаються з основними нормованими метрологічними характеристиками засобів вимірювань; інформаційні, що характеризують здатність пристрою зменшити апріорну невизначеність про об'єкт вимірювання і контролю; економічні, які оцінюють економічну ефективність впровадження пристрою.

На цей час запропоновано і використовується для характеристики ефективності перетворювачів інформації безліч інформаційних критеріїв, які можна поділити на дві групи. До першої групи відносяться класичні інформаційні критерії (ентропія, швидкість передачі інформації, пропускна здатність тощо), розроблені К. Шенноном [21]. Другу групу утворюють критерії ентропійної похибки [21], інформаційної здатності [19] тощо.

У табл. 1.1 зведені результати оцінювання ефективності методів вимірювання поверхневого натягу.

З таблиці випливає, що найвищий показник ефективності і найдовший час вимірювання має метод притиснутого пухирця. Тому доцільно вибрати саме

його для оцінки динамічного поверхневого натягу.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика методів визначення поверхневого натягу

Метод визначення поверхневого натягу	Методична похибка, %	Діапазон вимірювання, мН/м	Час вимірювання, с	Ефективність
1	2	3	4	5
Потенційний	0,1	0,05...150	-	1
1	2	3	4	5
Висячої краплі	0,15	10...100	60	0,85
Лежачої краплі	0,15	1...100	3...180	0,87
Меніска біля плоскої стінки	1	1...70	90...100	0,65
Об'єму краплі	0,1	15...75	20...1000	0,86
Максимального тиску в пухирці	0,15	15...75	5...9999	0,82
Капілярного підняття	0,2	15...60	180	0,77
Пластинки Вільгельмі	0,1	0,01...100	180...250	0,86
Обертової краплі	0,15	0,01...20	50	0,8
Витягування циліндра	0,2	10...80	230	0,65

Притиснутого пухирця	0,15	1...100	3...86400	0,87
-------------------------	------	---------	-----------	------

### 1.3 Постановка задачі на магістерську роботу

Із вищенаведених методів вимірювання поверхневого натягу рідин і розчинів ПАР метод притиснутого пухирця ідеальний для того, щоб фіксувати зміну поверхневого натягу протягом довгого періоду часу. Для нього характерні відсутність випаровування рідини і чистота вимірювальної поверхні, що підвищує точність методу. Даний метод найбільш підходить для вимірювання динамічного поверхневого натягу, де зміна ПН відбувається за великі проміжки часу, тобто досягнення рівноважного стану може тривати багато годин.

Тому в магістерській роботі вважається доцільним вибрати для вимірювання поверхневого натягу рідин і розчинів ПАР саме метод притиснутого пухирця, при якому є можливим одержати більш точну інформацію про поверхневі властивості досліджуваних речовин.

При проектуванні магістерської роботи ставляться такі задачі.

1. Обґрунтувати метод притиснутого пухирця для вимірювання поверхневого натягу рідин і розчинів ПАР.
2. Проектування структурної схеми приладу для вимірювання поверхневого натягу.
3. Розробка конструкції приладу.
4. Розробка методики проведення вимірювання поверхневого натягу за допомогою розроблюваного приладу.
5. Метрологічна оцінка розробленого приладу.

## 2 РОЗРОБКА УДОСКОНАЛЕНИХ МЕТОДИК ВИМІРЮВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ НА ОСНОВІ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРИТИСНУТОГО ПУХИРЦЯ

З метою розробки удосконалених методик вимірювання поверхневого натягу на межі розділу рідина - повітря шляхом вимірювання відповідних геометричних параметрів притиснутого пухирця, які б дозволили автоматизувати процес вимірювання цих параметрів і розрахунок значення поверхневого натягу, дослідити залежність поверхневого натягу від часу існування межі розділу, необхідно одержати математичний опис процесу утворення притиснутого пухирця. Отримані у результаті залежності дадуть можливість розрахувати конкретні значення відповідних параметрів притиснутого пухирця для усього діапазону реальних рідких фаз, що, у свою чергу, сприятиме розробці методики контролю.

Крім цього, вказане дасть можливість сформулювати вимоги до приладу в цілому з метою реалізації у ньому удосконалених методик визначення поверхневого натягу.

### 2.1 Утворення пухирця у процесі вимірювання поверхневого натягу методом притиснутого пухирця

Метод притиснутого пухирця полягає у формуванні під тиском пухирця повітря із вертикально встановленого товстостінного капіляра, який знаходиться у резервуарі з досліджуваною рідиною.

Згідно із другим законом Лапласа, поверхні рідини і твердого тіла контактують під сталим кутом. Його визначають як границю кута між нормаллями до поверхонь твердого тіла і рідини при зближенні їх основ до лінії перетину рідкої і твердої поверхонь. Дається також визначення цього кута як границі двогранного кута між площинами, дотичними до поверхонь, що не змінює суті цієї величини [22].

Розглянемо випадок утворення пухирця на торці товстостінного вертикально розміщеного капіляра, який змочується рідиною (рис. 2.1).

До початку вимірювання меніск рідини має горизонтальну форму, оскільки рідина знаходиться у стані спокою. Після подачі повітря, у рідині починає утворюватися повітряний пухирець, тоді меніск рідини із горизонтального положення переходить у пол. 1. В цей момент часу крайовий кут змочування між стінкою отвору капіляра і меніском у точці їх дотику через рідину  $\theta$  буде меншим за  $90^\circ$ .

На рис. 2.1 внутрішній край нижнього торця капіляра показаний заокругленим тому, що гранично таку форму мають в більшості навіть найретельніше оброблені капіляри, що використовуються для визначення поверхневого натягу рідин методом притиснутого пухирця.

Подальша подача повітря і приведе до збільшення об'єму пухирця і його переміщення у пол.2 та пол.3. При цьому крайовий кут змочування  $\theta$  залишиться незмінним і буде меншим  $90^\circ$ .

Аналогічним чином розглянемо формування притиснутого пухирця на нижньому торці такого ж капіляра у випадку рідини, що не змочує матеріал, з якого виготовлено капіляр (рис. 2.2).

Як і в попередньому випадку, спочатку кромка рідини буде у горизонтальному стані, а після подачі повітря переміститься у пол.1. При цьому крайовий кут змочування  $\theta$  буде більшим за  $90^\circ$ .

Оскільки, рідина не змочує матеріал капіляра, то при наступній подачі повітря пухирець не зможе втриматися біля його країв і почне переміщуватися по нижній частині стінки отвору капіляра. При цьому пухирець переходить у пол.2 та пол.3, а крайовий кут змочування  $\theta$  буде незмінним і меншим за  $90^\circ$ .

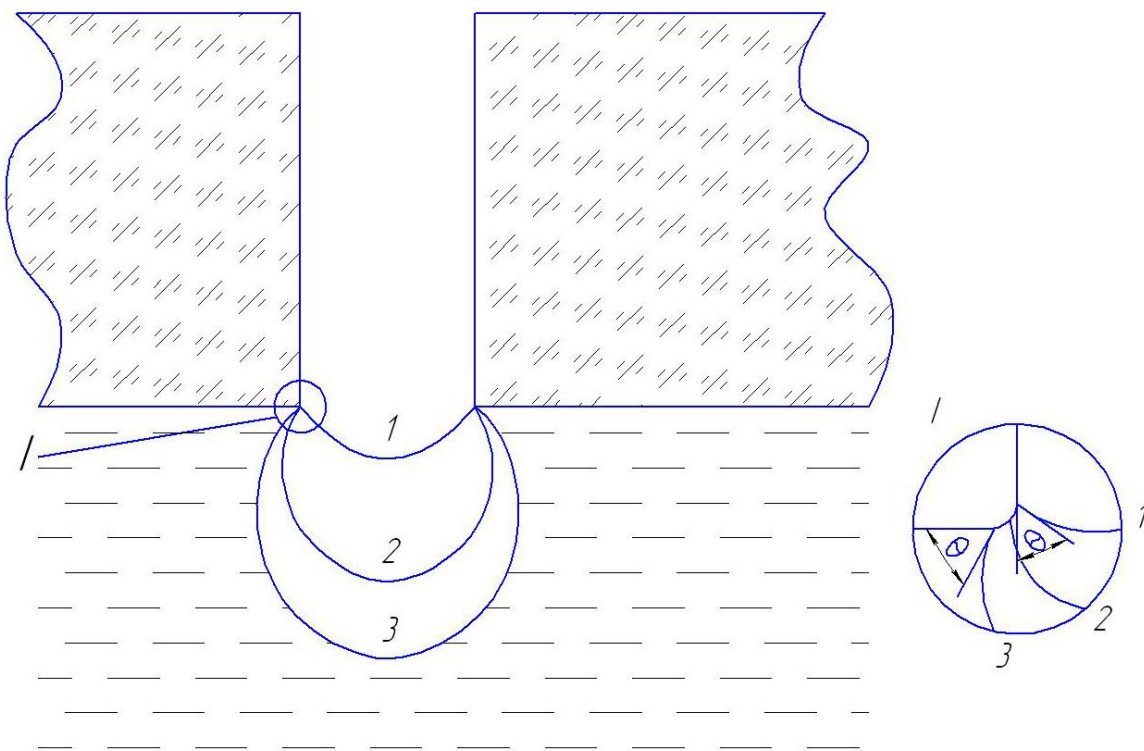


Рисунок 2.1 – Утворення пухирця на торці товстостінного вертикально розміщеного капіляра, який змочується рідиною

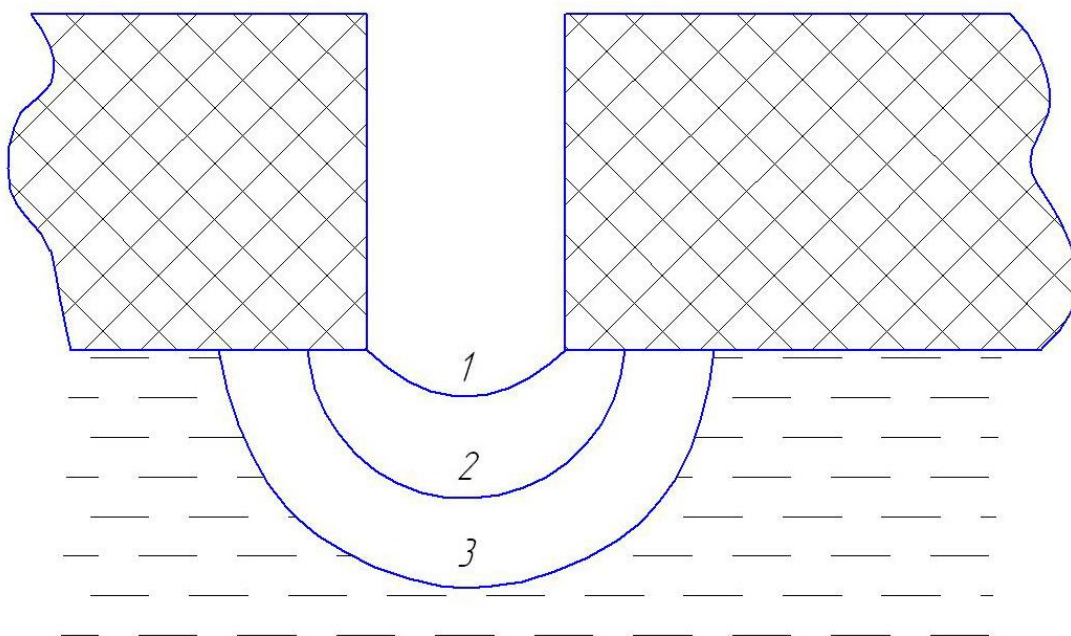


Рисунок 2.2 – Утворення пухирця на торці товстостінного вертикально розміщеного капіляра, який не змочується рідиною

## 2.2 Розробка методики розрахунку параметрів притиснутого пухирця і аналіз отриманих результатів

Для проведення оцінки розмірів притиснутого пухирця, розробки в подальшому удосконалених методик визначення поверхневого натягу  $\sigma$  методом притиснутого пухирця, оцінки похибок відомих і запропонованих методик вимірювання  $\sigma$  методом притиснутого пухирця тощо необхідні методика, алгоритм, відповідний програмний пакет, початкові і граничні умови, які дозволяють отримати усі необхідні геометричні параметри пухирця.

Положення про подібність менісків почали розвиватися ще у минулому сторіччі, Башфорт та Адамс у [23] в диференціальному рівнянні для осесиметричних менісків здійснюють перетворення координат шляхом ділення їх на радіус кривизни при вершині меніска  $R_0$ . Безпосередньо про подібність менісків тут не згадується, але таке перетворення можливе лише завдяки певним особливостям подібних явищ [22].

Уявлення про подібність дають можливість вказати на найбільш прийнятні форми залежностей між будь-якими однозначно заданими геометричними параметрами пухирця та сукупністю фізичних величин, об'єднаних у поняття капілярної сталої  $a^2$ , якою визначається форма меніска. Важливою задачею є встановлення цих залежностей.

За відправну точку при вирішенні поставленої задачі - математичному описові процесу утворення притиснутого пухирця - доцільно вибрати основне рівняння капілярності [22, 24, 25], яке з врахуванням зображення притиснутого пухирця (рис. 2.3) буде таким:

$$\Delta P_A = P_{1A} - P_{2A} = \sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (2.1)$$

де  $\Delta P_A$  — перепад тиску через поверхню пухирця у т.  $A$ ;  $P_{1A}$  - тиск усередині пухирця біля т.  $A$ ,  $P_{2A}$  - тиск зовні пухирця біля т.  $A$ ,  $R_1, R_2$  - радіуси кривизни поверхні меніска у двох взаємноперпендикулярних перерізах, яким належить точка  $A$ .

З іншого боку, тиск  $P_{1A}$  з урахуванням тиску  $P_{1O}$  усередині пухирця біля її вершини, віддалі по вертикалі від т.  $O$  до т.  $A$  з і густини повітря у пухирця  $\rho_1$  буде таким:

$$P_{1A} = P_{1O} + \rho_1 g z . \quad (2.2)$$

Аналогічно тиск  $P_{2A}$  з урахуванням тиску зовні пухирця біля її вершини  $P_{2O}$ , віддалі  $z$  і густини рідини  $\rho_2$  буде таким:

$$P_{2A} = P_{2O} + \rho_2 g z . \quad (2.3)$$

Підставляючи (2.2) і (2.3) у (2.1) отримаємо, що

$$P_{1O} + \rho_1 g z - P_{2O} - \rho_2 g z = \sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right). \quad (2.4)$$

Різниця тисків ( $P_{1O} - P_{2O}$ ) визначається також кривизною поверхні у її вершині (у т.  $O$ ) таким чином:

$$P_{1O} - P_{2O} = 2\sigma/b. \quad (2.5)$$

Тоді (2.4) з урахуванням (2.5) буде таким:

$$\frac{2\sigma}{b} + \Delta\rho g z = \sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right). \quad (2.6)$$

Якщо поділити (2.6) на  $\sigma$ , тоді з урахуванням виразу для  $a^2$  отримаємо наступне:

$$\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{2}{b} + \frac{2}{a^2} z . \quad (2.7)$$

Меридіональний радіус кривизни осесиметричного меніска визначається як:

$$\frac{1}{R_1} = \frac{d\varphi}{dl} , \quad (2.8)$$

де  $\varphi$  - кут нахилу дотичної у довільній точці меридіана,  $s$ - довжина дуги у цій точці (рис. 2.4).

Для будь-якої поверхні обертання один із головних радіусів кривизни дорівнює довжині відрізка нормалі до перетину її з віссю обертання. З рис. 2.4 видно, що

$$KM=R_2 = \frac{x}{\sin \varphi} . \quad (2.9)$$

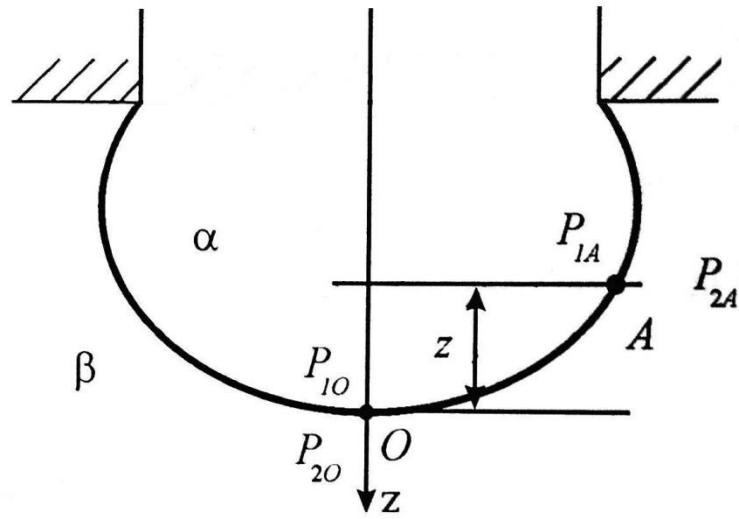


Рисунок 2.3 – Профіль осесиметричного притиснутого пухирця

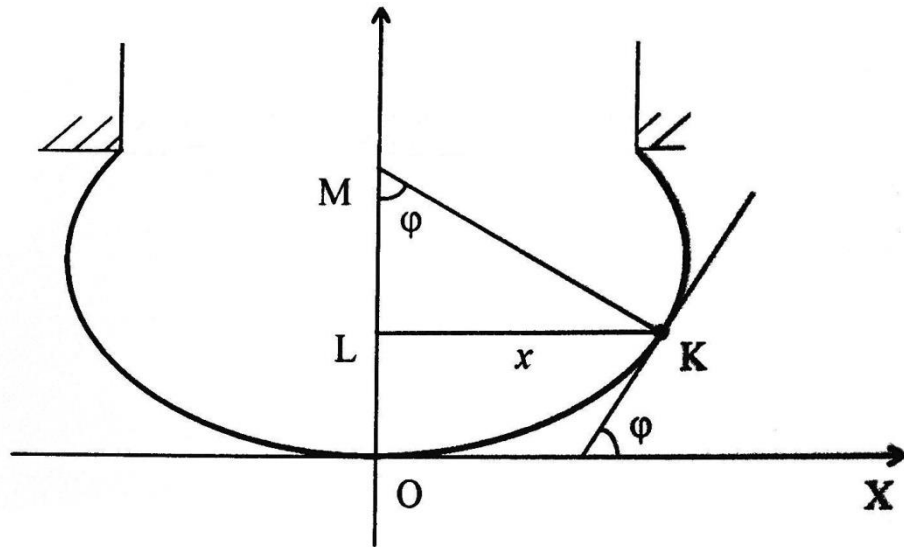


Рисунок 2.4 – Визначення геометричних параметрів притиснутого пухирця

Таким чином, можемо записати [1]:

$$\frac{d\varphi}{dl} + \frac{\sin \varphi}{x} = \frac{2}{b} + \frac{2}{a^2} z, \quad (2.10)$$

де  $\varphi$  – кут нахилу дотичної до профілю притиснутого пухирця у даній точці;

$l$  – довжина дуги профілю пухирця від омбілічної точки до розглядуваної;

$x, y$  – відповідно горизонтальна і вертикальна координати точки профілю. Початковими умовами для розв'язку рівнянь системи (2.10) при  $\varphi=0$  є такі:

$$x = y = 0, R_1 = R_2 = b,$$

де  $R_1$  і  $R_2$  - радіуси кривизни поверхні в точці поверхні пухирця, що розглядається, у взаємно-перпендикулярних перерізах, один із яких є меридіанним.

За потреби існує можливість знаходити площу та об'єм капілярної поверхні. У цьому випадку до системи (2.10) потрібно ввести дві додаткові рівності:

$$\frac{dA}{ds} = 2\pi x, \quad (2.11)$$

$$\frac{dV}{ds} = \pi x^2 \cos \varphi, \quad (2.12)$$

де  $V$  – об'єм меніска,  $A$  – площа поверхні.

У випадку, коли зручніше оперувати безрозмірними параметрами, можна здійснити наступні перетворення. Позначимо

$$l_1 = \frac{1}{a}, \beta = \frac{b^2}{a^2}, z_1 = \frac{z}{a}, x_1 = \frac{x}{a} \quad (2.13)$$

і помножимо кожен із доданків рівності (2.13) на  $a$ . При цьому (2.13) набуде наступного вигляду:

$$a \frac{d\varphi}{dl} + a \frac{\sin \varphi}{x} = \frac{2}{b} a + \frac{2}{a} z. \quad (2.14)$$

З урахуванням (2.13) можна записати:

$$\frac{d\varphi}{dl_1} + \frac{\sin \varphi}{x_1} = \frac{2}{\sqrt{b}} + 2z_1. \quad (2.15)$$

Таким чином, рівняння (2.15) дає можливість встановити теоретичний профіль притиснутого пухирця у безрозмірних координатах. Форма його визначається коефіцієнтом  $\beta$ . Діапазон зміни коефіцієнта  $\beta$  можна оцінити, виходячи із реально можливих значень  $a^2$  та  $R_0$  ( $\beta = 0,1 \div 10$ ).

Розв'язком рівняння (2.15) буде набір значень  $\varphi_i, \frac{s_1}{a}, \frac{x_1}{a}, \frac{z_1}{a}$  для певного значення  $\beta, i=1..n$ , де  $n$ - кількість точок, отриманих у процесі розв'язування.

Виходячи з властивостей поверхонь обертання, можна вивести додаткові

диференційні рівняння:

$$\frac{dx_1}{dl_1} = \cos \varphi, \quad \frac{dz_1}{dl_1} = \sin \varphi, \quad \frac{dV_1}{dl_1} = \pi \cdot x_1^2 \cdot \sin \varphi, \quad \frac{ds_1}{dl_1} = 2\pi x_1, \quad (2.16)$$

де

$$V_1 = V/a^3, \quad S_1 = S/a^2, \quad (2.17)$$

- відповідно приведені об'єми меніска і його площа.

Об'єднання диференційних рівнянь (2.14) та (2.16) у систему дає математичну модель капілярної поверхні меніска притиснутого пухирця, що утворюється на торці вертикального капіляра, який знаходиться у рідині:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi}{dl_1} = \frac{1}{\sqrt{b}} - \frac{\sin \varphi}{x_1} + z_1, & \frac{dx_1}{dl_1} = \cos \varphi, & \frac{dz_1}{dl_1} = \sin \varphi, \\ \frac{dV_1}{dl_1} = \pi \cdot x_1^2 \cdot \sin \varphi, & \frac{ds_1}{dl_1} = 2\pi x_1. \end{cases} \quad (2.18)$$

При цьому початкові умови в омбілічній точці ( $l_1 = 0$ ):

$$\varphi = 0, \quad x_1 = 0, \quad z_1 = 0, \quad S_1 = 0, \quad V_1 = 0. \quad (2.19)$$

Система нелінійних диференціальних рівнянь (2.18), (2.19) не піддається аналітичному розв'язку, тому варто застосувати чисельні методи інтегрування.

Виходячи з умови (2.19) на першому кроці інтегрування системи (2.18) виникає невизначеність типу  $0/0$  у виразі  $\sin \varphi / x_1$ . Для розкриття цієї невизначеності слід скористатися тим, що із умови симетрії випливає рівність радіусів кривизни  $R_1 = R_2 = R_0$  у омбілічній точці, тобто:

$$\lim_{l_1 \rightarrow \infty} \frac{d\varphi}{dl_1} = \lim_{l_1 \rightarrow \infty} \frac{\sin \varphi}{x_1} = \frac{1}{R_{01}} = \frac{1}{2\sqrt{b}}. \quad (2.20)$$

Розв'язком математичної моделі (2.18) – (2.20) – є множина капілярних поверхонь, форма яких визначається значенням параметра приведеної гаусової кривизни  $\frac{1}{\sqrt{b}}$ .

Процес інтегрування системи (2.18) починається при початкових умовах (2.19) з урахуванням (2.20). При цьому наперед задаються значенням параметра  $a_r^2 = (a/r)^2$  (капілярної сталої приведеної до радіуса капіляра), який відображає величину ПН.

Точка кінця інтегрування знаходиться при досягненні рівності  $x_1 = r_1$ , де

$r_1 = (r/a) = (1/a_r)$ , при цьому другою крайовою умовою є досягнення, монотонно зростаючою характеристикою меніска заданого дискретного значення.

Для представлення квазістатичного утворення газової бульбашки слід вибрати такі характеристики меніска, які монотонно змінюються з його ростом і можуть приймати наперед задані дискретні значення. Виходячи з мети моделювання у якості такої характеристики вибрано об'єм меніска  $V_1$  і кут між нормаллю до капілярної поверхні і віссю симетрії  $\varphi$ . Як показали результати моделювання, інші характеристики (висота, площа, довжина дуги осьового перерізу меніска) не є монотонними. Зростаюча послідовність дискретних значень цих характеристик відповідає набору капілярних поверхонь, що відображає квазістатичне утворення притиснутого пухирця для заданого значення  $a_r^2$  (сталого ПН при заданому радіусі капіляра) (рис.2.5).

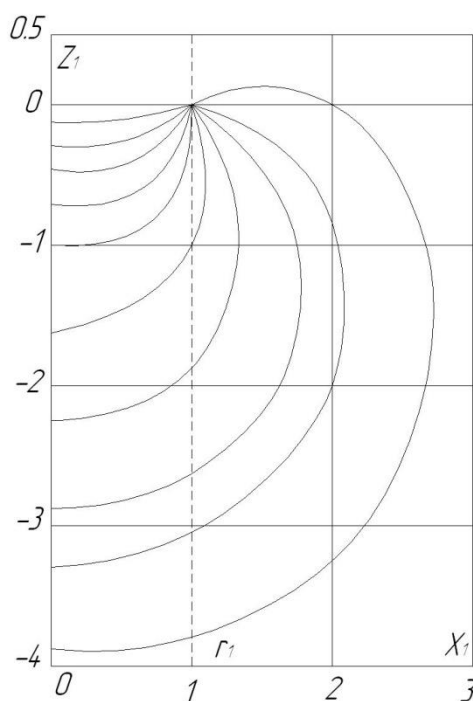


Рисунок 2.5 – Послідовність капілярних поверхонь для  $a_r^2 = 1$

Для отримання результатів моделювання у вигляді послідовності капілярних поверхонь пухирця за зростаючим об'ємом  $V_1$  з кроком дискретизації  $\Delta V_1$ , при заданому значенню  $a_r^2$ , запропонована наступна

методика розрахунків. Так як рівняння системи (2.18) та умова (2.19) залежить від одного параметру  $\frac{1}{\sqrt{b}}$ , то здійснюється пошук такого значення  $\frac{1}{\sqrt{b}}$ , щоб в результаті інтегрування до виконання умови  $V_1 = n\Delta V_1$  виконувалась умова:

$$x_1\left(\frac{1}{\sqrt{b}}\right) = r_1, \quad (2.21)$$

де  $n$  – послідовність дискретних значень об'єму.

Чисельне інтегрування системи диференційних рівнянь (2.18) – (2.19) здійснювалося методом Рунге-Кутта четвертого порядку [26], який описується системою п'яти рекурентних співвідношень:

$$\begin{aligned} y_{m+1} &= y_m + \frac{h}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) k_1, \\ k_1 &= f(x_m, y_m), \\ k_2 &= f\left(x_m + \frac{h}{2}, y_m + \frac{hk_1}{2}\right), \\ k_3 &= f\left(x_m + \frac{h}{2}, y_m + \frac{hk_2}{2}\right), \\ k_4 &= f(x_m + h, y_m + hk_3), \end{aligned} \quad (2.22)$$

де  $h$  – крок інтегрування.

Похибка обмеження для цього методу становить  $Kh^5$ , що відповідає розкладанню в ряд Тейлора включно до члена степені  $h^4$ .

Враховуючи, що значення перших похідних (правих частин рівнянь (2.18)) змінюються в досить широкому діапазоні, то доцільно змінний крок інтегрування. Це дає можливість зменшити час обчислення, а також підвищити точність визначення результатів інтегрування за рахунок корекції похибки на кроці по кожній змінній.

Корекція здійснюється шляхом порівняння результатів інтегрування з кроком  $h$  (два цикли) і  $2h$  (один цикл) у кожній наступній точці. Одночасно вноситься поправка, яка визначається з екстраполяційного переходу до границі за Річардсоном [27] для заданої достовірності результатів – п'ять значущих цифр:

$$\Delta y = \frac{y_{2h} - y_h}{15}, \quad (2.23)$$

де  $\Delta y$  – поправка,  $y_{2h}$  – приріст функції на одному циклі з кроком  $2h$ ,  $y_h$  – приріст функції на одному циклі з кроком  $h$ . Таким чином похибка на кроці у результаті введення поправки має порядок  $Kh^5$ .

Для дослідження процесу утворення притиснутого пухирця на нижньому торці вертикально встановленого капіляра розроблено програму, спрощений графічний алгоритм функціонування якої у середовищі Windows наведено на рис. 2.6.

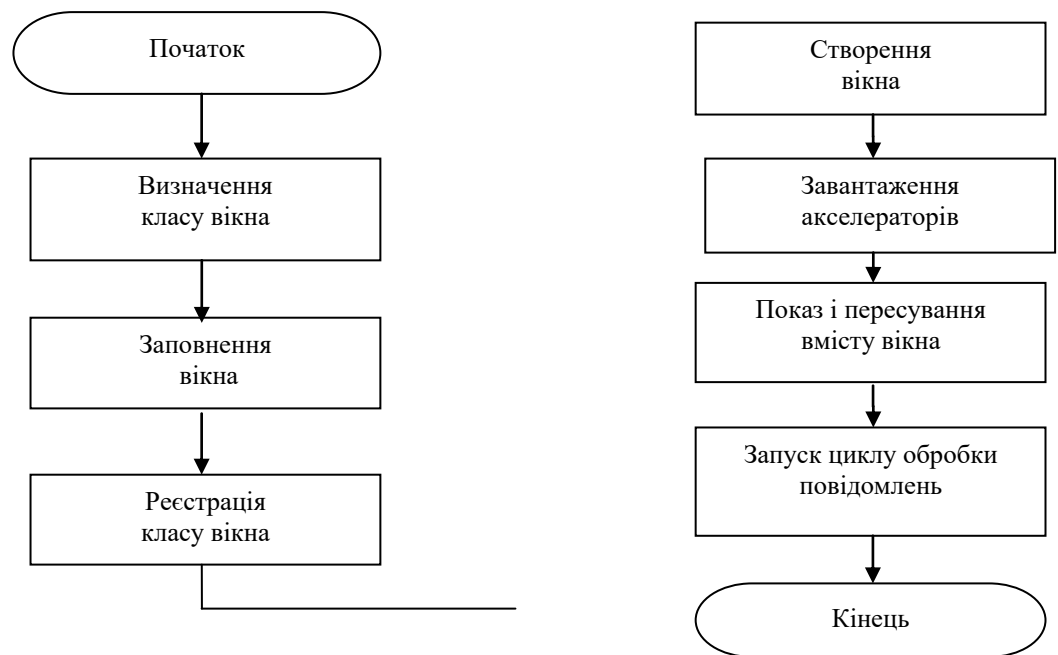


Рисунок 2.6 – Спрощений алгоритм функціонування програми розрахунку параметрів притиснутого пухирця у середовищі Windows

На рис. 2.7. показано блок-схему розрахунку параметрів пухирця методом Рунге-Кутта за заданими параметрами (початкові умови для розв'язку диференціального рівняння, коефіцієнт форми пухирця, крок).

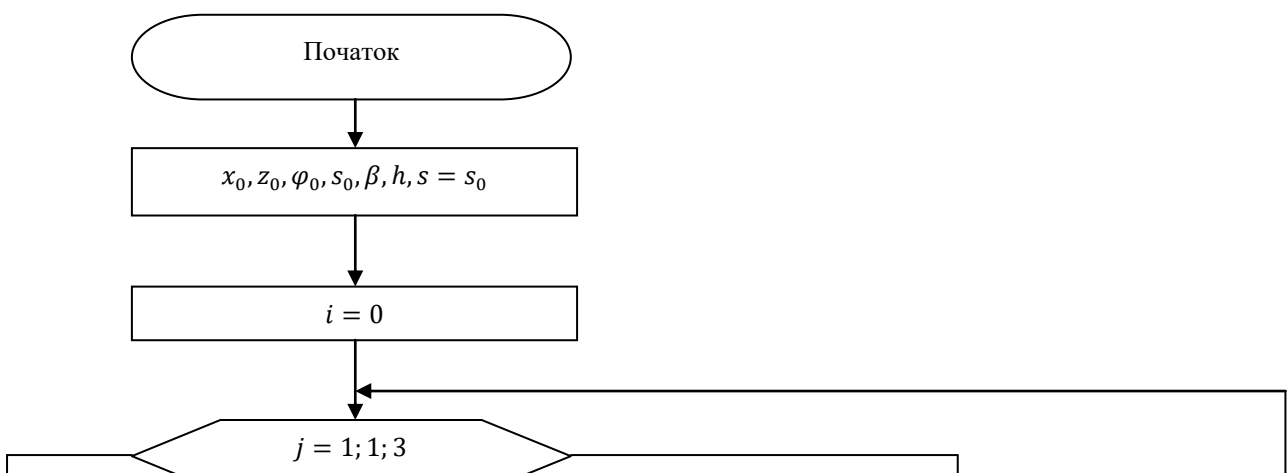


Рисунок 2.7 – Блок-схема підпрограми розв’язку системи диференціальних рівнянь методом Рунге-Кутта

Текст програми для розрахунку параметрів притиснутого пухирця наведено у додатку А, результати розрахунків у вигляді таблиці – у додатку Б.

Математичне моделювання профілю притиснутого пухирця дає можливість оцінювати зміну його розмірів у процесі росту, що дозволяє оптимально проектувати оптичні системи приладів для вимірювання поверхневого натягу методом притиснутого пухирця, а також полегшує розробку нових методик вимірювання поверхневого натягу вказаним методом.

2.3 Проходження променів світла через притиснутий пухирець при вимірюванні поверхневого натягу

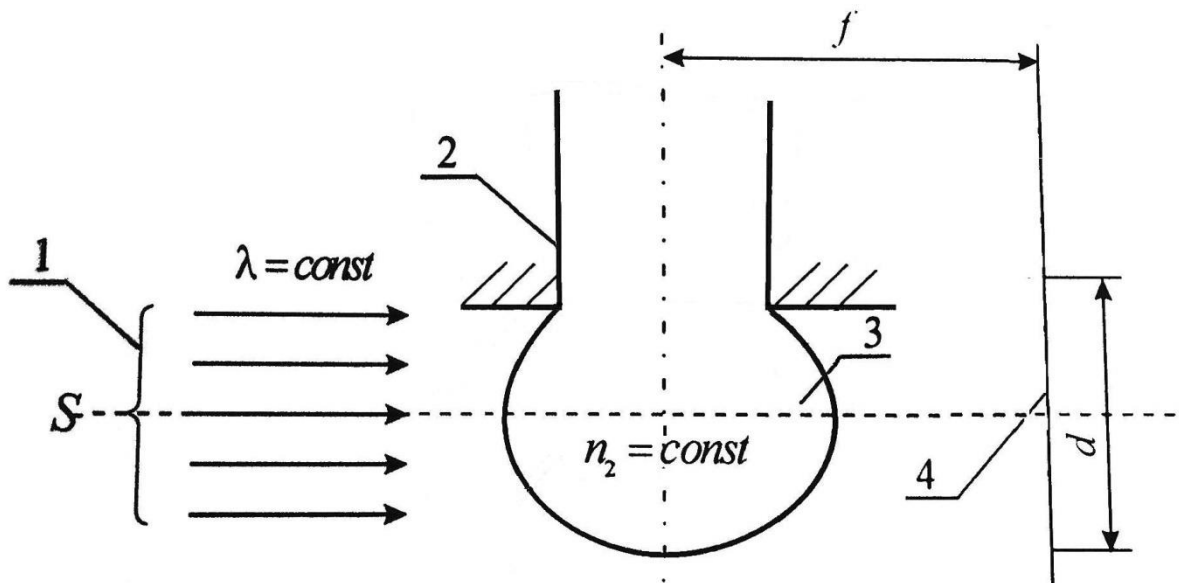
Вирішуючи задачу формування притиснутого пухирця та отримання його тіньового зображення, необхідно знати процес утворення такого зображення та вплив на нього положення і характеристик оптичної системи освітлювача.

Геометрична оптика, залишаючись наближеним методом побудови зображень в оптичних системах, дозволяє розібрати основні явища, пов'язані із проходженням через них світла і є основою теорії оптичних приладів. Скористаємося її законами для побудови ходу променів при проходженні через утворений притиснутий пухирець у процесі вимірювання поверхневого натягу.

Розглянемо ідеальний варіант. Нехай промені світла поширюються паралельним монохроматичним пучком, що дозволить при розрахунку прийняти коефіцієнт заломлення повітря у пухирці  $n_2 = const$ . Схему моделі наведено на рис. 2.8.

Дана модель призначена для отримання теоретичного тіньового зображення притиснутого пухирця на світлочутливій ПЗЗ матриці відеокамери.

Промінь світла, поширюючись у рідині від джерела  $S$ , досягає пухирця 2 під кутом  $i_1$ , заломлюється на межі розділу рідина-повітря під кутом  $i_2$  до нормалі до поверхні у даній точці і продовжує рух в об'ємі пухирця. Досягнувши межі розділу повітря-рідина промінь, потрапляючи на межу під кутом  $i'_1$  до нормалі,



1 – джерело параксіальних монохроматичних променів; 2- капіляр;  
 3- притиснутий пухирець; 4 – цифровий мікроскоп

Рисунок 2.8 – Схема моделі проходження променів світла через притиснутий пухирець:

заломлюється і виходить з об'єму пухирця під кутом  $i'_2$  до нормалі до поверхні у точці виходу. Після цього він продовжує свій рух у повітрі, поки не потрапить у площину об'єктива 4, що знаходиться на відстані, рівній фокусній віддалі об'єктива  $f$  від меридіанного перерізу пухирця, яка обмежена величиною діаметра  $d$ . Таким чином утворюється тіньове зображення притиснутого пухирця.

Відзначимо, що тіньове зображення притиснутого пухирця утворюється внаслідок неоднакового заломлення променів освітлювача при проходженні через межі розділу контактуючих середовищ (рідини та повітря).

Подібно до вимоги осесиметричності меніска для різних реалізацій методу притиснутого пухирця, паралельність та монохроматичність променів освітлювача є наріжним каменем утворення адекватного тіньового зображення досліджуваного пухирця.

Вимірювання поверхневого натягу рідин та розчинів методом притиснутого пухирця базується на вимірюванні геометричних параметрів профілю притиснутого пухирця. Тіньове зображення утвореного притиснутого пухирця за умови дотримання вищевказаних вимог відповідає саме меридіанному перерізові, тобто профілеві пухирця. Крім того, тіньове зображення дає змогу працювати із практично прозорими об'єктами, що важливо за умов поставленої задачі. Тому такий спосіб отримання інформації є найбільш достовірним, а технічна реалізація найбільш простою.

#### 2.4 Розробка удосконалених методик вимірювання поверхневого натягу на основі інтерпретації геометричних параметрів притиснутого пухирця

Кожна із відомих на сьогодні методів вимірювання поверхневого натягу, які були розглянуті у п. 1.1, має свої переваги і недоліки. Тому актуальною є розробка таких методів, які б усували недоліки наданих раніше методів і базувалися б на виміряних в процесі експерименту за допомогою сучасних оптико-вимірювальних систем відповідних розмірні притиснутого пухирця.

На початку 80-х років серед способів отримання і аналізу зображення лежачої, висячої крапель було запропоновано спосіб, що передбачає використання відеотехніки. Остання дає змогу на основі отриманого зображення здійснити розрахунок поверхневого натягу.

##### 2.4.1 Визначення поверхневого натягу на основі значень радіусів кривизни поверхні притиснутого пухирця

Вимірювання параметрів  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $b$  і  $z$  (де  $b$  - радіус кривизни при вершині пухирця,  $z$  - вертикальна координата довільної точки поверхні притиснутого пухирця) поверхні притиснутого пухирця, які необхідні для безпосереднього застосування вказаного раніше рівняння (2.6) для розрахунку поверхневого натягу, раніше внаслідок відсутності відповідних оптико-вимірювальних систем було пов'язане із значними труднощами. Тому більшість дослідників

запропонували наближені залежності для розрахунку поверхневого натягу з використанням інших параметрів пухирця, вимірювання яких здійснити легше. Але при цьому, як буде показано пізніше, виникають значні похибки.

Вираз для розрахунку  $\sigma$  на основі геометричних розмірів притиснутого пухирця може бути отриманий на основі залежності (2.6) після її відповідного перетворення і є таким:

$$\sigma = \frac{\Delta \rho g z}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} - \frac{1}{b}} \quad (2.24)$$

Таким чином, для визначення  $\sigma$  згідно (2.24) необхідно попередньо визначити такі геометричні параметри притиснутого пухирця:  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $b$  і  $z$ , а також різницю густин між газом у пухирці і оточуючої рідиною (розчином ПАР).

При наявності отриманого за допомогою відеотехніки на екрані монітора зображення профілю притиснутого пухирця (рис. 2.9) суть розробленої методики визначення поверхневого натягу на межі контакту газ у пухирці – навколишня рідина полягає у наступному:

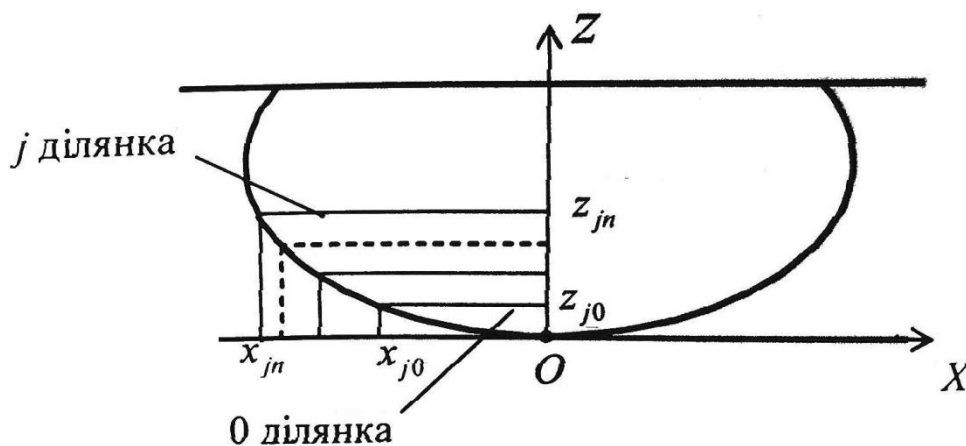


Рисунок 2.9 – Профіль притиснутого пухирця

1) увесь профіль пухирця розбивають на дві симетричні відносно вісі  $z$  частини, після чого кожен з них розбивають на  $j$  горизонтальних ділянок. Розбивку на окремі ділянки здійснюють пропорційно висоті пухирця  $z$ . Профіль

кожної із ділянок оцифровують, тобто за допомогою відеотехніки вимірюють координати  $z_{jk}$  і  $x_{jk}$  для всіх  $j = 1, \dots, m$  і  $k = 1, \dots, n$  ( $m$  - кількість ділянок на профілі притиснутого пухирця,  $n$ — кількість точок на кожній із ділянок). На основі отриманих таким чином координат  $(z_{j1}, z_{j2}, \dots, z_{jk})$  і  $(x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jk})$  профіль кожної із  $j$ - ділянок (крім профілю, що включає т.  $O$ ) з достатньою точністю описуємо у вигляді певної поліноміальної залежності виду  $z_j = f(x)$ ;

2) розраховують значення параметрів  $(1/R_1)_j$  і  $(1/R_2)_j$  профілю пухирця для серединної площини січення кожної  $j$ -ї ділянки за виключенням ділянки, що включає т.  $O$ . Для цього використовують такі відомі залежності

$$\frac{1}{R_1} z''_j / (1 + z'^2_j)^{3/2}, \quad (2.25)$$

$$\frac{1}{R_2} z'_j / x (1 + z'^2_j)^{1/2}, \quad (2.26)$$

де  $z'_j, z''_j$  - відповідно перша та друга похідні від функції  $z_j$ , по  $x$ . Аналогічно знаходять радіус кривизни поверхні  $b$  при вершині пухирця;

3) на основі отриманих значень  $(1/R_1)_j$  і  $(1/R_2)_j, 1/b$ , а також попередньо визначеного значення  $\Delta\rho$  і  $g$  розраховують значення поверхневого натягу  $\sigma$  для кожної із  $j$  ділянок за допомогою залежності (2.24), після чого знаходять усереднене значення  $\sigma$ .

Застосування рівнянь (2.25) і (2.26) справедливе у тому разі, коли поверхня пухирця є тілом обертання, оскільки рівняння капілярності (2.9) передбачає осесиметричність притиснутого пухирця.

З аналізу даної методики видно, що точність визначення  $R_1$  та  $R_2$  значною мірою залежить від правильності задання залежності  $z = z(x)$ . Існує кілька способів задання  $z(x)$ : апроксимація вхідного набору точок спеціальними функціями, звичайними поліномами, сплайн-функціями (у цьому випадку важливе значення має правильне задання крайових умов), згладжуючими сплайн-функціями. Розрахунок поверхневого натягу на основі радіусів кривизни наведений у додатку В.

## 2.5 Розробка алгоритму обробки зображення притиснутого пухирця

Зображення притиснутого пухирця, яке фіксується за допомогою цифрового мікроскопа, потребує попередньої обробки на персональному комп'ютері перед проведенням визначення координат точок профілю.

Алгоритм обробки зображення притиснутого пухирця такий:

- виділення необхідного фрагмента;
- фільтрація зображення;
- підвищення контрасту;
- виділення контуру;
- бінаризація;
- згладжування.

На сьогоднішній день відомо ряд методів обробки зображення, які призначені для вирішення конкретних задач. В зв'язку з цим необхідно проаналізувати ці методи обробки зображення притиснутого пухирця та вибрати найкращі.

### 2.5.1 Виділення необхідного фрагмента та фільтрація зображення притиснутого пухирця

Для скорочення інформаційної надлишковості зображення, необхідно виділити фрагмент пухирця, який знаходиться під капіляром. Виділення здійснюється по верхній кромці та зовнішньому діаметру капіляра.

Для приглушення шуму, що має місце на зображенні, використовуються низькочастотні фільтри. Існують лінійні та нелінійні фільтри.

Лінійні фільтри реалізуються лінійним перетворенням у вигляді прямокутної матриці форматом  $N \times N$ .  $N$  може дорівнювати 3, 5, 7, і т. д. Наприклад, при  $N=3$

$$H = 1K \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}, \quad (2.27)$$

де  $K$  – множник, що нормує;  $a_{kl}$  – ваговий множник.

З фізичної точки зору лінійні фільтри є фільтрами нижніх частот (фільтрами, що усереднюють), які знижують величину високочастотних гармонік як шуму, так і корисного зображення. Це приводить не лише до послаблення шуму, але і до розмиття контурів зображення. Для усунення ефекту розмиття контурів при зниженні величини шуму необхідно переходити до нелінійної обробки.

Прикладом нелінійного фільтра є медіанний фільтр. Медіанна фільтрація здійснюється шляхом руху деякої апертури (маски) вздовж дискретного зображення та заміни значення центрального елемента маски медіанним значенням вихідних елементів всередині апертури. Медіаною дискретної послідовності  $x_1, x_2, \dots, x_l$  для непарного  $L$  називають такий її елемент, для якого існують  $(L - 1)/2$  елементів, менших або рівних йому за величиною, та  $(L-1)/2$  елементів, більших або рівних йому за величиною. Тобто, медіаною є середній по порядку член ряду, який отримується при впорядкуванні вихідної послідовності. Наприклад, при використанні маски  $3 \times 3$  медіаною дискретної послідовності є значення п'ятого елемента. При медіанній фільтрації значення, спотворене шумовим викидом, замінюється на медіанне - викид на зображенні повністю придушений.

Характерною особливістю медіанного фільтра є збереження перепадів яскравості (контурів). При цьому, якщо перепади яскравості великі в порівнянні з дисперсією адитивного білого шуму, то медіанний фільтр дає менше значення СКВ в порівнянні з оптимальним лінійним фільтром. Особливо ефективним медіанний фільтр є у випадку імпульсного шуму.

Отже, для обробки зображення краплі обрано медіанну фільтрацію, оскільки вона має такі переваги перед лінійною: зберігає різкі перепади (границі); ефективно згладжує імпульсний шум; не змінює яскравість фону.

## 2.5.2 Підвищення контрасту та виділення контуру притиснутого пухирця

Слабкий контраст – найбільш поширений дефект фотографічних і телевізійних зображень, зумовлений обмеженістю діапазону відтворених яскравостей. Під контрастом розуміють різницю між максимальним і мінімальним рівнями півтонів у деякій області зображення, наприклад, у вікні (локальна контрастність) або всього зображення (глобальна контрастність). Шляхом збільшення контрастності можна покращити роздільну здатність окремих елементів зображення або зменшити спотворення, викликані впливом умов отримання зображень в оптико-електронних перетворювачах.

Одним з методів покращення контрасту є лінійне розтягування гістограми, коли рівням вихідного зображення, що лежать в інтервалі  $[L_{min}, L_{max}]$ , присвоюються нові значення, щоб охопити весь можливий інтервал зміни яскравості, в цьому випадку  $[0, 255]$ .

Контраст можна покращити, використовуючи нормалізацію гістограми. При цьому на весь максимальний інтервал рівнів яскравості  $[0, 255]$  розтягується не вся гістограма, що лежить в межах від  $L_{min}$  до  $L_{max}$ , а її найбільш інтенсивна ділянка  $[L_{min}, L_{max}]$ .

Метою вирівнювання гістограми (цю процедуру також називають лінеаризацією та еквалізацією) є таке перетворення, щоб, в ідеалі, всі рівні яскравості набули б однакової частоти, а гістограма яскравостей відповідала би рівномірному закону розподілу.

На основі проведеного аналізу відомих джерел для підвищення контрасту зображення пухирця обрано метод нормалізації гістограми.

Задача виділення контуру полягає в побудові зображення границі об'єкта та контурів однорідних областей. Методи виділення контурів можна класифікувати на методи високочастотної фільтрації, просторового диференціювання та функціональної апроксимації. Спільним для всіх цих методів є розгляд межі як області різкого перепаду функції яскравості зображення, відрізняються вони математичною моделлю поняття границі та

алгоритмом пошуку граничних точок. У відповідності з поставленими задачами до алгоритмів виділення контурів ставляться такі вимоги: виділені контури повинні бути найтоншими, без розривів та замкнутими. Однак це не завжди досягається, в більшості випадків контури отримуються незамкнутими і, як наслідок, не придатними для ряду процедур аналізу.

Існує велика кількість операторів, які здійснюють виділення контуру. До них відносяться оператор Робертса, Лапласа, Собела, Кені, Уоллеса, Кірша. Робота оператора Собела була реалізована програмним шляхом і разом з іншими показана у додатку Г.

Отже, на основі проведеного аналізу операторів виділення контуру, видно, що оператор Собела реалізує найбільший перепад яскравості, що забезпечує вибір порогу бінаризації на основі знаходження піків шляхом порівняння всіх локальних максимумів. Але цей оператор не дозволяє виділити контур із субпіксельною точністю.

В роботі запропоновано метод субпіксельного визначення координат краплі в результаті використання однонаправлених масок низькочастотних гауссових фільтрів відповідної орієнтації, що дозволяє отримати характерні точки перетину примежових кривих до та після фільтрації.

В основних методах визначення краю об'єктів він модулюється як різка зміна яскравості. Суть такого підходу полягає в пошуку точок, в яких градієнт досягає екстремуму. Цю умову повністю задовольняє Лапласіан двовимірної функції, але недоліком його є неможливість визначення координати краю з похибкою меншою ніж 0,5 пікселя. У зв'язку з цим у методі, що розроблявся, запропоновано використовувати градієнт тільки для визначення області найбільш різкої зміни яскравості, де знаходиться край зображення, а також для визначення орієнтації краю. Модуль градієнта зображення  $f(x, y)$  в точці  $(x, y)$  можна визначити:

$$\nabla f = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} = \sqrt{\left(\frac{df}{dx}\right)^2 + \left(\frac{df}{dy}\right)^2}, \quad (2.28)$$

а напрям вектора градієнта, тобто кут  $\alpha(x,y)$  між напрямом вектора  $\nabla f$  в точці  $(x, y)$  і віссю  $x$  визначається:

$$\alpha(x, y) = \arctg\left(\frac{G_y}{G_x}\right). \quad (2.29)$$

Таким чином, визначають можливу орієнтацію градієнта, яка може бути розбита на чотири сектори: горизонтальний, вертикальний та два під кутом у різні напрямки.

У лінійних оптичних системах оптичну передавальну функцію, як правило, апроксимують функцією Гаусса. Похідна від яскравості світла  $I(x)$  на межі зображення (у точці  $x_0$ ) описується

$$\frac{dI(x)}{dx} = A \cdot e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2}}, \quad (2.30)$$

де  $A$  - константа, що характеризує максимальне значення перепаду яскравості відбитого світла;  $\sigma_x$  - середньоквадратичний розподіл перепаду яскравості відбитого світла на межі;  $x_0$  - координати межі.

З іншої сторони зображення на практиці, як правило, згладжується гауссовим фільтром. Гауссіан не є єдиним ядром розмивання, але має ряд важливих особливостей. По-перше, ядра гауссіана є розділяючими, тобто згортка з ядром фільтра еквівалентна згортці з двома одновимірними ядрами - за напрямком  $x$  та за напрямком  $y$ . Отже, гауссіан можна факторизувати, отримавши добуток двох одновимірних гауссіанів. По-друге, виконуючи згортку гауссіана з гауссіаном, можна отримати ще один гауссіан. Тобто, можна отримати дуже згладжене зображення, повторно згладивши згладжене зображення. І по-третє, в результаті згладжування зображення можна отримати спільні точки перетину примежових кривих вхідного та фільтрованого зображення.

Тоді функція розсіювання за законом Гаусса для такої примежової кривої буде мати вигляд

$$G(x) = \frac{\Delta I}{(I_{max}-I_{min})\Delta x} \exp\left(-\frac{x^2\pi\Delta I^2}{(I_{max}-I_{min})^2\Delta x^2}\right), \quad (2.31)$$

де  $I_{max}$  – максимальне значення яскравості примежової кривої;  $I_{min}$  – мінімальне значення яскравості примежової кривої;  $\Delta I$  – максимальна зміна яскравості на примежовій кривій між двома сусідніми пікселями фотоприймального пристрою, відстань між якими  $\Delta x = 1$ .

Формула (2.31) дозволяє розрахувати функцію розсіювання для будь-якої примежової кривої.

### 2.5.3 Бінаризація зображення притиснутого пухирця

Більшість задач обробки зображення пов'язані з перетворенням напівтонового зображення в бінарне (двоградаційне). Таке перетворення здійснюється для того, щоб скоротити інформаційну надлишковість зображення, залишити в ньому лише ту інформацію, яка потрібна для подальшої обробки та для перетворення напівтонового зображення (що має багато градацій яскравості) в бінарне. В бінарному зображенні повинні бути збережені деталі, що нас цікавлять (наприклад, контур зображених об'єктів), та виключенні несуттєві моменти (фон).

Бінарне зображення отримується в результаті порогової обробки напівтонового зображення. Воно полягає в розділенні всіх елементів зображення на два класи за ознакою яскравості: об'єкт і фон. При цьому виконується поелементне перетворення виду

$$L_g(n_1, n_2) = \begin{cases} 1 & \text{при } L(n_1, n_2) \geq L_0 \\ 0 & \text{при } L(n_1, n_2) < L_0 \end{cases}, \quad (2.32)$$

де  $L_g(n_1, n_2)$  – вихідне значення яскравості в точці з координатами  $n_1, n_2$ ;

$L(n_1, n_2)$  – вхідне значення яскравості;  $L_0$  – деяке „порогове” значення яскравості.

Широкий клас процедур обробки зображень називається препаруванням, яке полягає в перетворенні зображення до вигляду, зручного для машинного аналізу. Операції препарування здійснюються за допомогою поелементних перетворень

спеціальних видів. Так, окремим випадком препарування є бінаризація.

Використовується і багато інших функцій поелементного перетворення.

До функцій поелементного перетворення відноситься перетворення „зрізу” яскравості, яке дозволяє виділити певний інтервал діапазону яскравостей вхідного зображення. Переміщуючи „робочий” інтервал по шкалі та змінюючи його ширину, можна визначити, які значення яскравості є на зображенні (і в яких точках), а яких не має, провести візуальний аналіз окремих зображень об'єктів, що відрізняються за яскравістю. Деталі, що не потрапляють у вказаний інтервал, тобто які відносяться до фону, відкидаються. Для препарування зображень також використовують такі поелементні перетворення: зріз яскравості із збереженням фону, неповну порогову обробку, контрастне масштабування, пілкоподібне контрастне масштабування.

На основі проведеного аналізу поелементних перетворень при препаруванні встановлено, що найбільш ефективним є бінаризація.

На сьогоднішній день існують потужні пакети для обробки зображення (Photoshop, Photostyler, Coral тощо), які дозволяють виділяти контур об'єктів, використовуючи фільтри, принцип дії яких заснований на розглянутих вище та інших відомих методах. Проте ці фільтри не виконують одночасно з виділенням контура бінаризації зображення. Для реалізації такої процедури була розроб

лена програма побудови бінарного зображення контурів краплі, яка здійснює медіанну фільтрацію, підвищення контрасту шляхом нормалізації гістограми, виділення контуру методом низькочастотної фільтрації та бінаризацію. При цьому важливим є правильний вибір порога. При надто високому порозі можуть з'явитися розриви контурів, а слабкі перепади яскравості не будуть виявлені. При надто низькому порозі через шуми та неоднорідності областей можуть з'явитися хибні контури. Визначення порога бінаризації пропонується проводити за алгоритмом вибору порога, заснованому на знаходженні основних піків гістограми шляхом порівняння всіх локальних максимумів. Після знаходження глобального максимуму  $M_0$  для всіх локальних

максимумів розраховується співвідношення

$$P_6 = \frac{M_1}{m_1 - 1}, \quad (2.33)$$

де  $M_1$  - значення першого локального максимуму;  $m_1$  - значення глобального мінімуму в діапазоні між глобальним максимумом та розглядуваним локальним.

Той з локальних максимумів, для якого значення виявиться найбільшим, вибирається в якості другого основного піку гістограми, після чого знаходиться поріг бінаризації. Бінаризація здійснюється по порогу з використанням співвідношення (2.32).

Згладжування виділених контурів дозволяє усувати розриви та виключати хибні контурні лінії. Таким чином, шляхом використання сучасних методів обробки зображення існує можливість отримання контура притиснутого пухирця, а отже підвищити точність знаходження геометричних параметрів меніска.

## 2.6 Розробка функціональної схеми приладу для вимірювання поверхневого натягу методом притиснутого пухирця

З метою розробки приладу, який повинен реалізувати запропоновані у п. 2.2 методики вимірювання поверхневого натягу, необхідно визначити основні вимоги, яким повинен відповідати такий прилад. До таких вимог слід віднести:

- можливість проведення вимірювання  $\sigma$  при стабілізованій температурі у діапазоні можливих значень 20°- 60°;

- проведення досліджень з метою одержання залежності  $\sigma$  від часу існування межі розділу фаз впродовж від 5с до 24 год.;

- можливість вимірювання відповідних розмірів притиснутого пухирця з абсолютною похибкою не більше 2 мкм;

- зменшення впливу вібрації на процес утворення притиснутого пухирця і на проведення вимірювань відповідних його геометричних розмірів;

- автоматична обробка результатів вимірювання геометричних параметрів

пухирця з метою розрахунку значення  $\sigma$  і представлення цих результатів у необхідній формі (графічна, таблична тощо) як на екрані монітора комп'ютера, так і у друкованій формі;

можливість запам'ятовування профілів притиснутого пухирця з метою їх обробки у подальшому і систематизації;

одержання результатів вимірювання з абсолютною похибкою не більше 1,5%;

забезпечення високої вірогідності результатів вимірювання  $\sigma$  (не менше 95%);

забезпечення безперервної роботи приладу впродовж 24 год.;

зручність при проведенні вимірювання  $\sigma$ , а також при обслуговуванні приладу.

Для реалізації обгрунтованого методу визначення динамічного поверхневого натягу, шляхом вимірювання геометричних параметрів притиснутого пухирця, в першу чергу, повинен бути розроблений вузол регульованого формування пухирця під горизонтальною поверхнею твердого тіла у досліджуваній рідині. Найпростіше такий вузол реалізувати у вигляді кювети, в яку заливається досліджувана рідина і опускається кришка з вертикально розміщеним капіляром, з якого і буде витискуватися пухирець у рідину.

З даним капіляром повинні бути з'єднані джерело і давач тиску. В ролі джерела тиску може бути використаний сильфонний вузол. Стискуючи сильфон будемо отримувати збільшення тиску в системі, що призведе до витискування пухирця. Давач тиску служить для перетворення величини тиску у електричний аналоговий сигнал. Оскільки, вироблюваний давачем тиску електричний сигнал є недостатнім за величиною, то для його підсилення слід використати підсилювач. Так як для керування процесом вимірювання і обробки результатів використовують персональний комп'ютер, то електричний сигнал перетворюють у цифровий за допомогою аналогово-цифрового

перетворювача.

Для визначення геометричних параметрів пухирця потрібно отримати цифрове зображення його профілю, яке буде оброблятися персональним комп'ютером. Для отримання даного зображення найкраще використовувати сучасні цифрові мікроскопи, які мають вихідний сигнал адаптований до персонального комп'ютера. За допомогою цифрового мікроскопа отримуємо на екрані монітора зображення пухирця на фоні світлового екрану освітлювача. Освітлювач повинен бути регульованим, для отримання контрастного зображення пухирця, чіткість картинки забезпечується наведенням цифрового мікроскопа на різкість. Величина збільшення регулюється ручкою на корпусі мікроскопа. Наведення на різкість здійснюється за допомогою механізму переміщення, який служить для точного встановлення зображення пухирця в полі зору цифрового мікроскопа.

Також, для точного визначення поверхневого натягу необхідно знати значення температури досліджуваної рідини. Для отримання даних значень у кювету встановлюється датчик температури, який вимірює значення температури за конкретні проміжки часу і передає отримані дані через підсилювач та аналогово-цифровий перетворювач на персональний комп'ютер.

## 2.7 Розробка конструкції приладу для вимірювання поверхневого натягу методом притиснутого пухирця

Прилад для вимірювання поверхневого натягу методом притиснутого пухирця складається з таких основних вузлів: датчик тиску 4, вимірювальна комірка 5, механізм переміщення 6, вузол освітлення 7, електронний блок 1 та цифровий мікроскоп 19. Всі ці вузли становляються на масивній основі з індикатором рівня та регульованими ніжками для встановлення горизонтальності.

На основу 8 за допомогою кронштейнів 17 та гвинтів 21 кріпляться задня 13 та бокові 15, 16 стінки приладу так, щоб вони розмістилися

перпендикулярно до неї і щільно прилягали одна до одної. Біля стінки 13 встановлюється задавач тиску 4, який за допомогою болта 22 приєднують його до основи 8. Задавач тиску Також на задню стінку гвинтами прикріплюють освітлювач 7, всередині якого встановлено табло із щільно розташованих світло діодів, які посилають пучок світла на матовий екран, на фоні якого і спостерігається силует пухирця. Освітлювач 7 за допомогою джгута 2, який кріпиться скобами до задньої стінки 13 приладу, під'єднується до електронного блоку 1, що знаходиться на основі. Електронний блок містить давач тиску, підсилювачі, аналогово-цифрові перетворювачі. Крім того у ньому є два блоки живлення: один для вищенаведених вузлів, а другий – регульований блок живлення для освітлювача, ручка регулювання якого виведена назовні.

На основу перед задатчиком тиску встановлюється у різьбове гніздо на різьбі стійка 9, яка використовується як підставка для вимірювальної комірки 5. Стійка 9 повинна бути розміщена на такій висоті, щоб при встановленні вимірювальна комірка знаходилася на рівні середини освітлювача 7 і отвору на передній стінці приладу 14.

Після підключення всіх вузлів встановлюється передня стінка 14, вона прикріплюється гвинтами до основи. На задню стінку 13 за допомогою завіс 3 кріпиться кришка 12, яка відкривається коли необхідно встановити вимірювальну комірку з досліджуваною рідиною.

Перед закритою частиною приладу розміщується електронний блок 1, так, щоб він щільно прилягав до стінки 14, і закріплюється гвинами 21 до основи 8. Механізм переміщення 6 кріпиться гвинтами до основи 8 перед електронним блоком 1. За допомогою відповідних ручок можна змінювати положення цифрового мікроскопа 19 для отримання чіткішого та більш відцентрованішого зображення пухирця.

Цифровий мікроскоп 19 прикріплюється до механізму переміщення 6 за допомогою гвинта 11, який дає можливість йому переміщуватися у горизонтальній площині, збільшуючи або зменшуючи відстань до отвору у

стілці 14, тим самим наводячи на різкість зображення притиснутого пухирця.

Після прикріплення і встановлення всіх основних вузлів приладу заповнену досліджуваною рідиною чи розчином ПАР вимірювальну комірку 5 встановлюють на стійку 9 і за допомогою трубок 24 під'єднують до задавача тиску 4 і до давача тиску, який знаходиться в електронному блоці 1. Також, слід під'єднати давач температури, що знаходиться у вимірювальній комірці 5 до електронного блоку 1 для передачі значень температури рідини чи розчину ПАР.

2.8 Розробка методики проведення вимірювання поверхневого натягу за допомогою розроблюваного приладу

При проведенні вимірювання поверхневого натягу приладом ВПНП-1 спочатку виконують горизонтування установки за допомогою рівня. Потім під'єднують прилад до мережі живлення 220 В і до USB-порта персонального комп'ютера.

В режимі підготовки наступним кроком є очищення (промивання) вимірювальної комірки 5 від рідин чи розчинів ПАР, які досліджувалися попередньо. Після очищення у комірку наливають досліджувану рідину до встановленої мітки, для того, щоб при опусканні кришки, рідина не переливалася через краї. Під'єднують кришку трубками 24 до датчика тиску в електронному блоці 1 і до джерела тиску 4.

Першим етапом проведення самого вимірювання є налаштування оптичної системи, тому за допомогою давача тиску витискують перший пухирець не повністю і включають освітлювач 7. Потім на екрані монітора отримують зображення пухирця і наводять його на різкість за допомогою ручки електронного мікроскопа 19, для наведення його чітких контурів. Також підрегулюють освітлення для отримання більш контрастного зображення пухирця.

Наступним етапом є визначення максимального тиску при якому пухирець

буде відриватися від кришки вимірювальної комірки. За допомогою джерела тиску поступово збільшують тиск до моменту відривання пухирця. Інформація про  $P_{max}$  через давач тиску передається на персональний комп'ютер. Потім тиск підрегулюють до потрібної величини, так, щоб наступний повітряний пухирець під час вимірювання був близький до відриву проте залишався в стійкому стані.

Переключають персональний комп'ютер в режим вимірювання, під час якого програма слідкує за тиском, температурою і сигналізує при зміні цих параметрів. Також за задані відрізки часу фіксуються параметри пухирця (координати профілю, тиск, радіуси кривизни) і запам'ятовуються отримані фото пухирця.

Після того як отримують чіткі і контрастні зображення профілю притиснутого пухирця відбувається їхня цифрова обробка. Перш за все, виділяється необхідний фрагмент притиснутого пухирця, без зображення капіляру чи горизонтальної площини. Потім, для того, щоб зменшити "шум" на фото потрібно його відфільтрувати за допомогою лінійного або нелінійного фільтра. Наступний крок передбачає підвищення контрасту та виділення контуру притиснутого пухирця, який можна виконати використовуючи відомі оператори Робертса, Лапласа, Собела та інших. Також потрібно перетворити отримане напівтонове зображення у двоградаційне, тобто бінарне, для того, щоб скоротити його інформаційну надлишковість і згладити отриманий результат, для виключення розривів і хибних контурних ліній.

#### Висновки до розділу

Отримані шляхом теоретичного аналізу результати щодо процесу формування пухирця при вимірюванні поверхневого натягу методом притиснутого пухирця, проходження світлових променів через притиснутий пухирець та методик вимірювання поверхневого натягу можна звести до

наступних висновків:

а) проведено аналіз процесу формування притиснутого пухирця на торці вертикально встановленого товстостінного капілярів;

б) розроблено методику розрахунку безрозмірних параметрів притиснутого пухирця, яка дозволяє для відповідного значення радіуса кривизни при вершині розраховувати безрозмірні координати точок, що лежать на межі розділу, кут нахилу дотичної до горизонталі для кожної точки, довжину дуги профілю пухирця (за нульову точку приймається вершина краплі) у даній точці; проведено розрахунок цих параметрів для коефіцієнта  $\beta$ , який визначає форму краплі у діапазоні від 0,1 до 10;

в) проведено аналіз проходження світлових променів через притиснутий пухирець у процесі вимірювання поверхневого натягу методом притиснутого пухирця. Даний аналіз робить можливим вимірювання геометричних параметрів притиснутого пухирця і використання їх при визначенні поверхневого натягу;

г) розроблена методика визначення поверхневого натягу рідин і розчинів на межі розділу рідина - повітря. Суть якої полягає у визначення радіусів кривизни у двох взаємно-перпендикулярних площинах, які проходять через довільну точку поверхні краплі, що належить межі розділу, кривизни краплі у її вершині, а також віддалі від вказаної точки до вершини;

д) з урахуванням результатів теоретичних досліджень, які наведені у цьому розділі, розроблені вимоги до приладу, який повинен реалізувати запропоновані методики вимірювання поверхневого натягу. Зокрема, звертається увага на тип освітлення (монохроматичністю, параксіальністю променів, живлення лампи стабілізованою постійною напругою), вимоги до чистоти матеріалу капіляра та його параметрів, шляхи зменшення вібрації, автоматичну обробку результатів вимірювання відповідних геометричних параметрів, необхідність забезпечення стабільних характеристик вузлів приладу, можливість використання приладу для проведення різних наукових

досліджень, на зручність при проведенні вимірювання поверхневого натягу і представленні результатів вимірювання, при обслуговуванні приладу тощо.

### 3 МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ВІДОМИХ І УДОСКОНАЛЕНИХ МЕТОДИК ТА РОЗРОБЛЕНОГО ПРИЛАДУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ МЕТОДОМ ПРИТИСНУТОГО ПУХИРЦЯ

3.1 Аналіз інструментальних та сумарних похибок приладу, який реалізує запропонований метод вимірювання поверхневого натягу

Схема накопичення сумарної похибки розробленого приладу ВПНП-1 для вимірювання поверхневого натягу рідин та їхніх розчинів, який реалізує запропоновану методику (п. 2.4.1), що передбачає визначення радіусів кривизни профілю притиснутого пухирця для довільної точки її поверхні у двох взаємно-перпендикулярних площинах та омбілічній точці, наведена на рис. 3.1.

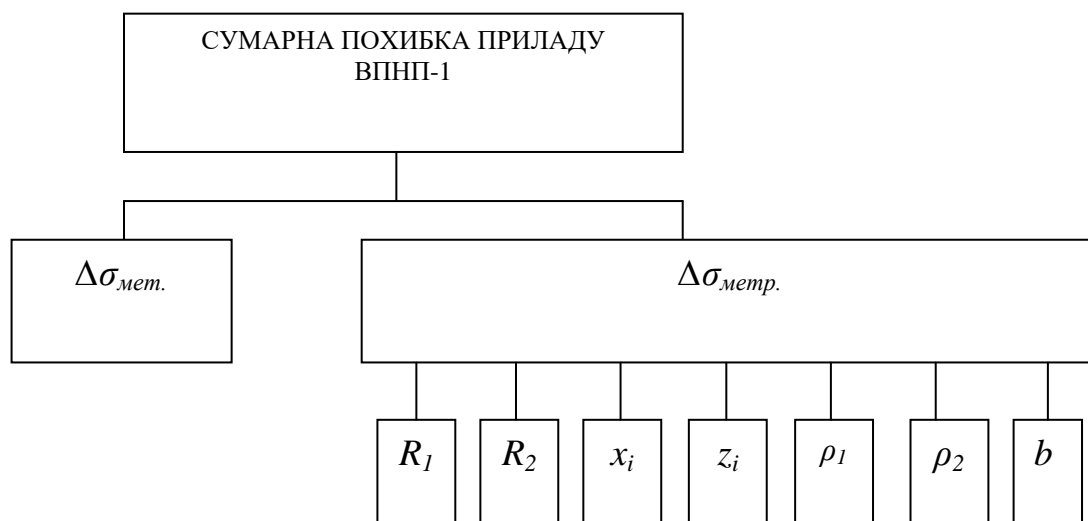


Рисунок 3.1 – Схема накопичення сумарної похибки приладу для вимірювання поверхневого натягу рідин методом притиснутого пухирця, який базується на вимірювання радіусів кривизни капілярної поверхні

Вона включає похибки від вимірювання густин досліджуваної рідини  $\rho_1$  і повітря  $\rho_2$ , вказаних радіусів кривизни  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $b$  та лінійних координат точок, що належать профілеві притиснутого пухирця  $x_i$ ,  $z_i$  (де  $i$  – кількість точок, що

отримуються у процесі виділення контуру).

У випадку існування залежності, що пов'язує вхідні і вихідні параметри процесу вимірювання поверхневого натягу рідин аналітично значення окремих складових  $\Delta\sigma_{l_i}$  інструментальної похибки  $\Delta\sigma_{\text{інстр.}}$  диференціальним методом розраховують наступним чином:

$$\Delta\sigma_{\text{інстр.}} = \sum_{i=1}^N \Delta\sigma_{l_i} = \frac{\delta\sigma}{\delta l_i} \Delta l_i, \quad (3.1)$$

де  $l_i$  –  $i$ -й аргумент згаданої залежності, який відповідає її певному вхідному параметрові;  $\Delta l_i$  – значення абсолютної похибки вимірювання  $i$ -го параметра;  $N$  – кількість параметрів.

Густина повітря становить  $\rho_2 = 1,0014 \text{ кг/м}^3$  при  $20^\circ\text{C}$ . Відхилення реальної густини повітря від довідникового значення є достатньо малим, що дозволяє не враховувати дану похибку. Однак при дослідженні поверхні розділу рідина-газ, що не є повітрям, необхідно враховувати густину цього газу з достатнім ступенем точності (максимальна зведена похибка вимірювання не повинна перевищувати 0,5 %. Отже,  $\Delta\rho_2 = 0$ .

Точність визначення координат точок меридіанного перерізу пухирця, що лежать на межі розділу рідина-повітря, визначається роздільною здатністю світло-електричного перетворювача (СЕП), який використовується для отримання зображення притиснутого пухирця.

Телевізійне зображення можна визначити як сукупність відліків сигналу з прив'язкою до координат мішені. Освітленість пікселя характеризує значення відліку, а його координати визначають геометричні характеристики телевізійного зображення.

Розглянемо компоненти, які є основними джерелами похибок визначення геометричних характеристик телевізійного зображення.

Основними джерелами похибок СЕП є нерівномірність чутливості, фільтрація просторових частот, шуми самого перетворювача.

У [27] відзначається, що головними факторами, які впливають на роздільну здатність телевізійного засобу контролю є нерівномірність

чутливості та фільтрація просторових частот.

При застосуванні телевізійних засобів контролю, як правило, приймають, що роздільна здатність у площині зображення визначається розмірами пікселя, тобто точність визначення геометричних характеристик телевізійного зображення обмежена точним розміром пікселя по відповідній координаті.

У [28] показано визначення роздільної здатності через функцію передачі і деякий пороговий рівень коефіцієнта передачі модуляції  $K_{\Pi}$ . Для найбільш поширених у науковій практиці телевізійних засобів контролю на базі ПЗЗ шум СЕП описується нормальним законом розподілу. Це пояснюється тим, що шумовий сигнал утворюється під впливом одночасної дії кількох незалежних факторів. Тому ймовірність реєстрації сигналу визначається наступним чином:

$$P(q_3 < q_1 - q_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\infty}^{a_1 - a_2} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz, \quad (3.2)$$

де  $q_1$  - приведені значення сигналу  $A(t)$  у момент часу  $t$   $A(t)/\sigma$ ;  $q_2$  - приведені порогове значення  $A_{\Pi}/\sigma$ ;  $q_3$  - приведені шумове значення сигналу;  $z$  - випадкова величина;  $\sigma$  - середнє квадратичне значення шумового сигналу. Відповідно, умова реєстрації сигналу  $q_3 < q_1 - q_2$ . Аналіз виразу (3.2) [29] свідчить, що кількість ділянок, які можуть бути розрізнені у межах одного пікселя як окремі:

$$N = \frac{A_0}{3.2\sigma}, \quad (3.3)$$

де  $A$  - максимальний сигнал, який формується пік селем при освітленості  $E_0$ .

Таким чином, використання залежності вихідного сигналу пікселя від співвідношення між більш освітленою і менш освітленою його ділянками дозволяє збільшити точність визначення координат без внесення змін у оптико-електронну схему приладу.

У [28] зазначено, що гранична похибка вимірювання координати сучасних ПЗЗ може бути зменшена до 1 ...2 мкм.

Задача виділення контуру притиснутого пухирця характеризується наступними особливостями: сигнал, сформований пікселем, лежить в межах від

$A_{кр} = 35$  до фонового значення  $A_{\phi}=220$ ; значення  $A_{кр}$  згідно із [28] перевищує середнє квадратичне шумового сигналу ПЗЗ-камери, тобто:

$$N = \frac{A_{\phi}}{3.2A_{кр}}. \quad (3.4)$$

Отже, виходячи із оцінки сигналу, сформованого у полі зору приладу, можна у межах пікселя з ймовірністю 0,99 [28] розрізнити 2 ділянки.

При лінійному розмірі пікселя 0,7 мкм прилад дозволяє розрізнити ділянку 5 мкм. Якщо ймовірність реєстрації зменшити до величини 0,90 (величина, прийнятна для даної задачі), кількість ділянок становить 3. Відповідно, мінімальна ділянка, яку можна розрізнити, становить 2,5 мкм.

Таким чином, можна записати, що  $\Delta x = 2,5$  мкм,  $\Delta z = 2,5$  мкм.

Знаходження значення поверхневого натягу рідини на межі розділу рідина-повітря проводиться згідно із формулою (2.24). З урахуванням (3.1) можемо записати:

$$\Delta\delta_{\sigma_{інстр.}} = \frac{\partial\sigma}{\partial R_1} \frac{dR_1}{dx} \Delta x + \frac{\partial\sigma}{\partial R_2} \frac{dR_2}{dx} \Delta x + \frac{\partial\sigma}{\partial b} \frac{db}{dx} \Delta x + \frac{\partial\sigma}{\partial \rho_1} \Delta\rho_1 + \frac{\partial\sigma}{\partial \rho_2} \Delta\rho_2 + \frac{\partial\sigma}{\partial z} \Delta z \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial\sigma}{\partial R_1} = \frac{(\rho_1 - \rho_2)gz}{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} - \frac{2}{b}\right)^2 R_1^2}; \quad \frac{\partial\sigma}{\partial R_2} = \frac{(\rho_1 - \rho_2)gz}{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} - \frac{2}{b}\right)^2 R_2^2}; \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial\sigma}{\partial b} = \frac{-2(\rho_1 - \rho_2)gz}{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} - \frac{2}{b}\right)^2 b^2}; \quad \frac{\partial\sigma}{\partial z} = \frac{(\rho_1 - \rho_2)g}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} - \frac{2}{b}}$$

$$\frac{\partial\sigma}{\partial \rho_1} = \frac{gz}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} - \frac{2}{b}}; \quad \frac{\partial\sigma}{\partial \rho_2} = \frac{gz}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} - \frac{2}{b}}$$

Значення  $R_1$ ,  $R_2$  та  $b$  знаходяться шляхом апроксимації вхідного набору точок згладжуючим сплайном (вигляд полінома співпадає із звичайним кубічним сплайном) та обчислення за формулами (2.25, 2.26).

Назвемо функцію, що описує профіль притиснутого пухирця  $Z_I(x)$ . Тоді:

$$Z_1(x) = a_1 + c_1(x - x_1) + \frac{d_1}{2}(x - x_1)^2 + \frac{e_1}{6}(x - x_1)^3. \quad (3.7)$$

де  $a_1, c_1, d_1, e_1$  - коефіцієнти сплайна на відрізку, що включає точки з горизонтальними координатами  $x$  та  $x_1$  (точка з координатою  $x$  - це точка, через яку проходять дві взаємно-перпендикулярні площини, у яких лежать вказані радіуси кривизни).

Тоді:

$$\frac{dZ_1}{dx} = c_1 + d_1(x - x_1) + \frac{1}{2}e_1(x - x_1)^2; \quad \frac{d^2Z_1}{dx^2} = d_1 + e_1(x - x_1). \quad (3.8)$$

Таким чином, з урахуванням (2.25,2.26) можна записати, що

$$R_1 = \frac{\left[1 + \left(c_1 + d_1(x - x_1) + \frac{1}{2}e_1(x - x_1)^2\right)\right]^{3/2}}{d_1 + e_1(x - x_1)}, \quad (3.9)$$

$$R_2 = \frac{x \left[1 + \left(c_1 + d_1(x - x_1) + \frac{1}{2}e_1(x - x_1)^2\right)\right]^{1/2}}{c_1 + d_1(x - x_1) + \frac{1}{2}e_1(x - x_1)^2}. \quad (3.10)$$

Оскільки  $\Delta R_1 = \frac{dR_1}{dx} \Delta x$  і  $\Delta R_2 = \frac{dR_2}{dx} \Delta x$ , запишемо

$$\Delta R_1 = \left[ \frac{(1+A^2)A \left(c_1 + d_1(x - x_1) + \frac{1}{2}e_1(x - x_1)^2\right)}{d_1 + e_1(x - x_1)} - \frac{1}{2} \frac{(1+A^2)^3}{(d_1 + e_1(x - x_1))^2} \right] \Delta x, \quad (3.11)$$

$$\Delta R_2 = \left[ \frac{1}{2} \frac{1+A^2}{A} + x \left( c + d(x - x_1) + \frac{1}{2}e(x - x_1)^2 \right) - \frac{1}{2} \frac{(1+A^2)A \left( c + d(x - x_1) + \frac{1}{2}e(x - x_1)^2 \right)}{A^2} \right] \Delta x, \quad (3.12)$$

де  $A = c_1(x - x_1) + \frac{1}{2}d_1(x - x_1)^2 + \frac{1}{6}e_1(x - x_1)^3$ .

За аналогією з виразом (3.7) запишемо функцію  $Z_2(x)$ , що описує профіль лежачої краплі у омбілічній точці (вершині).

$$Z_2(x) = a_2 + c_2(x - x_1) + \frac{d_2}{2}(x - x_1)^2 + \frac{e_2}{6}(x - x_1)^3, \quad (3.13)$$

де  $a_2, c_2, d_2, e_2$  - коефіцієнти сплайна на відрізку, що включає точки з горизонтальними координатами  $x=0$  та  $x_1$ . Тоді

$$\Delta b = \left[ 3 \frac{(1+A^2)A \left(c_2 + d_2(x - x_1) + \frac{1}{2}e_2(x - x_1)^2\right)}{d_2 + e_2(x - x_1)} - \frac{1}{2} \frac{(1+A^2)^3}{(d_2 + e_2(x - x_1))^2} \right] \Delta x, \quad (3.14)$$

де  $A = c_2(x - x_1) + \frac{1}{2}d_2(x - x_1) + \frac{1}{6}e_2(x - x_1)^3$ .

З урахуванням того, що горизонтальна координата точки вершини  $x=0$ , вираз (3.14) можна записати у вигляді

$$\Delta b = \left[ 3 \frac{(1+A^2)A(c_2+d_2x_1+\frac{1}{2}e_1x_1^2)}{d_2+e_2x_1} - \frac{1}{2} \frac{(1+A^2)^3 e_2}{(d_2+e_2x_1)^2} \right] \Delta x. \quad (3.15)$$

При цьому  $A = c_2x_1 + \frac{1}{2}d_2x_1^2 + \frac{1}{6}e_2x_1^3$ .

Для визначення інструментальної похибки приладу, що реалізує дану методику, необхідно розрахувати профіль притиснутого пухирця, що відповідає певному коефіцієнтові форми, виконати обчислення за виразами (3.7) – (3.15) знайти результат за (3.15). Розрахунки показують, що сумарна похибка вимірювання поверхневого натягу запропонованою методикою розробленим приладом не перевищує 1,45%.

### 3.2 Визначення методичної похибки вимірювання поверхневого натягу методом притиснутого пухирця

Для проведення порівняльного метрологічного аналізу методичних похибок методик вимірювання поверхневого натягу рідин і розчинів методом притиснутого пухирця зручно скористатися наступним підходом. Необхідно задатися отриманою математичною моделлю притиснутого пухирця, яка б характеризувалася відповідним набором параметрів, що входять до складу досліджуваної моделі. Такими параметрами можуть бути капілярна стала  $a^2$ , радіус кривизни у вершині пухирця  $b$ , коефіцієнт форми пухирця  $\beta$ , що об'єднує ці два параметри, координати точок профілю пухирця тощо.

Після цього слід застосувати математичний апарат досліджуваного методу до вхідного (розрахованого) набору даних з метою знаходження шуканого параметра (у даному випадку, капілярної постійної або пов'язаних із нею величин) і порівняння його із аналогічним, що був використаний як задаючий при проведенні розрахунку моделі.

Обчислення згідно із методикою Дорсі проводяться згідно із виразами

$$\frac{2}{cx_e^2} = 0,0481q + 0,05200/q - 0,12268, \quad (3.16)$$

$$q = \frac{H_{\pi/4}}{x_e} - 0,41421. \quad (3.17)$$

Інформативними параметрами для даної методики є значення екваторіального радіуса та величини  $H_{\pi/4}$  (р. 1 даної роботи). Отже, для дослідження методичної похибки вказаної методики необхідно розрахувати теоретичний профіль пухирця, задавшись безрозмірним параметром  $\beta$  і розрахувати значення величини,  $a^2/r^2$  що отримується за (3.16) двома способами: безпосередньо за вхідними даними та згідно із методикою Дорсі [31].

Відносна методична похибку методики у відсотках визначається наступним чином:

$$\delta = 100(a^2/r^2 - (a^2/r^2)_D)/(a^2/r^2)_D, \quad (3.18)$$

де  $(a^2/r^2)_D$  - дійсні значення параметра, що знаходяться згідно із досліджуваною методикою.

Результати такого розрахунку наведено у табл. 3.1. Згідно із табличними даними при  $\beta > 5$  відносна методична похибка за абсолютним значенням не перевищує 0,03%. Але при  $\beta < 5$  похибка зростає і при  $\beta = 0,9$  її значення різко збільшується і перевищує 1%. Слід зазначити, що згадана порогова величина безрозмірного параметра  $\beta$  охоплює більшість можливих комбінацій значень капілярної сталої та радіуса кривизни при вершині краплі для досліджуваних рідин.

Таблиця 3.1 – Результати розрахунку методичної похибки за методикою Дорсі

№ п/п	$\frac{H_{\pi/4}}{r}$	$\beta$	$\frac{a^2}{r^2}$ розр.	$\frac{a^2}{r^2}$ Дорсі	$\delta \frac{a^2}{r^2}$ , %
1	2	3	4	5	6
1	0,45	0,942	1,3404	1,3320	0,596
2	0,451	0,977	1,3004	1,2925	0,6062
3	0,452	1,013	1,2624	1,2552	0,5733
4	0,453	1,05	1,2264	1,2197	0,5433
5	0,454	1,088	1,1921	1,1861	0,5037
6	0,455	1,126	1,1595	1,1541	0,4654
7	0,456	1,165	1,1285	1,1236	0,4300
8	0,457	1,204	1,099	1,0946	0,3990
9	0,458	1,245	1,071	1,0669	0,3817
10	0,459	1,285	1,0443	1,0404	0,3689
11	0,46	1,327	1,0187	1,0151	0,3493
12	0,461	1,369	0,9942	0,9909	0,3300
13	0,462	1,411	0,9708	0,9677	0,3180
14	0,463	1,454	0,9484	0,9455	0,3101
15	0,464	1,498	,09269	0,9241	0,3019
16	0,465	1,543	0,9062	0,9036	0,2884
17	0,466	1,589	0,8863	0,8839	0,2746

Продовження табл.. 3.1

1	2	3	4	5	6
18	0,467	1,636	0,8672	0,8649	0,2659
19	0,468	1,683	0,8488	0,8466	0,2557
20	0,469	1,731	0,8311	0,8290	0,2486
21	0,47	1,78	0,814	0,8121	0,2371
22	0,471	1,83	0,7976	0,7957	0,2375
23	0,472	1,88	0,7817	0,7799	0,2291
24	0,473	1,931	0,7663	0,7647	0,2151
25	0,474	1,983	0,7515	0,7499	0,2120
26	0,475	2,036	0,7372	0,7356	0,2105
27	0,476	2,09	0,7233	0,7219	0,2002
28	0,477	2,144	0,7099	0,7085	0,1976
29	0,478	2,2	0,6969	0,6956	0,1918

Тому можна зробити висновок про доцільність застосування такої методики для знаходження капілярних сталих розплавів металів, а не рідин, оскільки розплави характеризуються значно більшим значенням коефіцієнта форми, для яких відносна методична похибка за даною методикою зберігає прийнятні значення.

### 3.3 Похибка вимірювання поверхневого натягу на основі визначення радіусів кривизни

Для аналізу розробленої методики вимірювання поверхневого натягу, яка передбачає визначення радіусів кривизни, скористаємось підходом, аналогічним до того, який було використано для аналізу методики Дорсі.

Розрахунковий профіль пухирця отримуємо, розв'язуючи рівняння (2.15). Значення радіусів кривизни отримуємо безпосередньо із розв'язку: (2.8), (2.9). Згідно із розробленою методикою знаходимо відповідні значення радіусів кривизни. Для знаходження відносної методичної похибки скористаємося виразом (2.24), розділивши його на  $\Delta\rho g$  і позначимо його через  $F$ :

$$F = \frac{z}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} - \frac{2}{b}} \quad (3.19)$$

Відповідний вираз, який оперує значеннями *радіусів* кривизни, знайденими досліджуваною методикою, позначимо  $F_1$ .

Тоді можна записати:

$$\delta F_{\text{відн}} = 100(F_1 - F)/F. \quad (3.20)$$

Результати розрахунків наведені у табл.3.2. Значення  $R_1, R_2$  відповідають радіусу кривизни, отриманим із розв'язку рівняння капілярності.

Таблиця 3.2 – Результати розрахунку похибки вимірювання поверхневого натягу на основі визначення радіусів кривизни ( $a^2 = 10 \text{ мм}^2$ ,  $b=1\text{мм}$ )

$l$	$\varphi$	$x$	$z$	$R_1$	$R_2$	$F$	$F_1$	$\delta F_{\text{відн}},$ %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,2441	0,2444	0,2416	0,0297	0,9956	0,9985	5,0544	5,0542	-0,0035
0,2473	0,2476	0,2448	0,0304	0,9955	0,9985	5,0553	5,0556	0,0048
0,2505	0,2509	0,2479	0,0312	0,9954	0,9985	5,0561	5,0555	-0,0121
0,2537	0,2541	0,2510	0,0320	0,9953	0,9984	5,0568	5,0563	-0,0093
0,2569	0,2573	0,2541	0,0328	0,9952	0,9984	5,0573	5,0571	-0,0046
0,2601	0,2605	0,2572	0,0337	0,9950	0,9983	5,0577	5,0571	-0,0113
0,2633	0,2638	0,2603	0,0345	0,9949	0,9983	5,0580	5,0572	-0,0154
0,2665	0,2670	0,2634	0,0353	0,9948	0,9982	5,0581	5,0589	0,0156
0,2697	0,2702	0,2664	0,0362	0,9947	0,9982	5,0582	5,0573	-0,0177
0,2729	0,2734	0,2695	0,0370	0,9945	0,9982	5,0582	5,0580	-0,0033
0,2761	0,2766	0,2726	0,0379	0,9944	0,9981	5,0581	5,0577	-0,0091
0,2793	0,2799	0,2757	0,0388	0,9943	0,9981	5,0579	5,0580	0,0009
0,2825	0,2831	0,2788	0,0397	0,9942	0,9980	5,0577	5,0583	0,0110
0,2857	0,2863	0,2819	0,0406	0,9940	0,9980	5,0574	5,0579	0,0103
0,2889	0,2895	0,2849	0,0415	0,9939	0,9979	5,0571	5,0569	-0,0041
0,2922	0,2928	0,2880	0,0424	0,9938	0,9979	5,0567	5,0571	0,0084
0,2954	0,2960	0,2911	0,0433	0,9936	0,9979	5,0562	5,0554	-0,0172
0,2986	0,2992	0,2941	0,0443	0,9935	0,9978	5,0557	5,0547	-0,0202
0,3018	0,3025	0,2972	0,0452	0,9933	0,9978	5,0552	5,0547	-0,0099
0,3050	0,3057	0,3003	0,0462	0,9932	0,9977	5,0547	5,0553	0,0116
0,3082	0,3089	0,3033	0,0472	0,9931	0,9977	5,0541	5,0538	-0,0050

Таким чином, абсолютне значення відносної методичної похибки даної методики не перевищує 0,15%.

### 3.4 Розробка методики звіряння похибки приладу ВПНП-1

Наявність приладу ВПНП-1 у заводській лабораторії чи у науково-дослідній організації дозволяє вирішувати питання, пов'язані із дослідженням поверхневого натягу рідин та їхніх розчинів на межі контакту рідина (розчин) - повітря. Для оцінки реальних метрологічних характеристик і проведення звіряння таких приладів достатньою є їхня метрологічна атестація, яка повинна включати процедуру проведення звіряння приладу згідно із наведеними нижче методичними вказівками.

Важливим аспектом при проведенні звіряння приладу ВПНП-1 є перевірка його похибки, яка згідно із наведеними метрологічними характеристиками не повинна бути більшою 1,45%, тобто клас точності приладу може бути визначений як 1,5.

Для визначення реальної похибки приладу ВПНП-1 необхідні проби зразкових атестованих рідин, для яких значення поверхневого натягу на межі контакту рідина-повітря відоме з похибкою, хоча б у 3 рази меншою за похибку вимірювання приладу і знаходиться у його робочому діапазоні. Дану проблему рекомендується вирішувати шляхом виготовлення каліброваних, а у подальшому атестованих калібрів відповідної форми, за розмірами яких можна здійснювати визначення значення поверхневого натягу умовної рідини (оскільки виготовлення калібру із формою, що відповідає формі реальної краплі рідини у даних умовах - задача практично неможлива).

Матеріал, з якого виготовлятиметься калібр повинен мати відомий якомога менший коефіцієнт температурного розширення. Діаметр калібру та коефіцієнт температурного розширення повинні бути атестованими органами стандарту України із загальною похибкою не більшою за 0,5 %.

Для виготовлення калібру можуть бути використані нержавіюча сталь,

фторопласт, поліетилен тощо, які дозволяють виготовляти тіла вказаної форми.

Калібрів повинно бути не менше трьох з різними діаметрами. Наприклад, 1,5 мм, 2,0 мм, 2,5 мм. Тобто розміри калібру повинні бути такими, щоб відповідати реальним граничним розмірам краплі рідини у процесі росту.

Вказані калібри повинні періодично атестуватися, мати як відповідні нормативні документи для проведення їхньої атестації, так і підтверджуючі їхній клас точності, а також повинні зберігатися у відповідності із технічними умовами, крім того, у атестаті на кожний калібр повинна бути вказана залежність зміни лінійних розмірів калібру від температури оточуючого середовища при зміні її від 15°C до 50°C через 1°C або коефіцієнт температурного розширення матеріалу, з якого виготовлено зразок.

Кожний із калібрів повинен також супроводжуватися атестованими значеннями умовного поверхневого натягу на межі контакту із повітрям.

Процес звіряння похибки приладу ВПНП-1 за допомогою вказаних калібрів повинен відбуватися наступним чином.

Процес підготовки приладу до початку вимірювань відбувається аналогічно, як і у випадку проведення досліджень значення поверхневого натягу реальної рідини.

Каліброване тіло необхідно помістити у місце утворення притиснутого пухирця. Після цього вмикають прилад і проводять вимірювання геометричних розмірів “пухирця” відповідно із вибраною методикою (за значеннями радіусів кривизни чи за площею та екваторіальним діаметром). Під час проведення вимірювань калібр повинен перебувати у полі зору телевізійної системи контролю і займати приблизно 90% ефективного розміру світлочутливої матриці.

Після цього вмикають режим визначення поверхневого натягу за отриманими геометричними параметрами.

Аналогічні вимірювання проводять для інших калібрів.

Порівнюють значення умовного поверхневого натягу із градувальними для кожного із калібрів з урахуванням температури навколишнього середовища і на основі такого порівняння оцінюють похибку приладу ВПНП-1.

На основі отриманих результатів роблять висновок щодо відповідності похибки приладу ВПНП-1 її нормованому значенню.

#### Висновки до розділу

Аналізуючи приведені в 3-ому розділі результати метрологічного аналізу відомих і розглянутої методик контролю МН рідин методом притиснутого пухирця, а також приладів, які реалізують ці методики контролю можна зробити такі висновки:

а) проведено аналіз існуючої методики вимірювання поверхневого натягу методики Дорсі. Методична похибка методики Дорсі становить 1% і більше у реальному діапазоні зміни капілярної постійної. Зроблено висновок про доцільність використання методики Дорсі для вимірювання поверхневого натягу розплавів металів, а не рідин та їхніх розчинів;

б) розроблена методика визначення методичної похибки розробленої методики вимірювання ПН рідин методом притиснутого пухирця, що передбачає визначення радіусів кривизни капілярної поверхні для довільної точки профілю та у вершині пухирця;

в) розроблена методика визначення методичної похибки розробленої методики вимірювання ПН рідин методом притиснутого пухирця, що передбачає визначення площі верхньої частини профілю притиснутого пухирця, обмеженої екваторіальним діаметром та вершиною пухирця і цього діаметра;

г) проведений аналіз складових інструментальних та сумарних відносних похибок приладів, які реалізують методики контролю ПН методом притиснутого пухирця. Сумарна похибка вимірювання поверхневого натягу з використанням значень радіусів кривизни не перевищує 1,45 %.

## ВИСНОВКИ

В даній магістерській роботі здійснено аналіз відомих методів вимірювання поверхневого натягу рідин і розчинів ПАР на межі розділу фаз рідина – повітря. Обрано метод притиснутого пухирця для проведення вимірювання, як такий, що може надати інформацію про динамічний поверхневий натяг протягом довгого періоду часу.

Досліджено процес утворення притиснутого пухирця із вертикально розміщеного капіляра у рідинах, які змочують і не змочують матеріал капіляра, тобто кут  $\theta$  у яких менший або більший за  $90^\circ$ . Розроблено методику розрахунку параметрів притиснутого пухирця, яка дозволяє для відповідного значення радіуса кривизни при вершині розраховувати безрозмірні координати точок, що лежать на межі розділу фаз. Проведено аналіз проходження світлових променів через притиснутий пухирець, який знаходиться у рідині.

Розроблено функціональну схему приладу для вимірювання поверхневого натягу методом притиснутого пухирця та визначено основні вимоги яким він повинен відповідати. Розроблено складальне креслення, яке показує оптимальне розміщення всіх наявних вузлів для зручного і швидкого використання приладу.

Проведено метрологічну оцінку методики вимірювання поверхневого натягу на основі визначення радіусів кривизни профілю притиснутого пухирця і визначено, що сумарна похибка вимірювання не перевищує 1,45%.

## ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кісіль І.С. Вибір методу для вимірювання динамічного поверхневого натягу [Текст] / І.С. Кісіль, В.О. Горелов // Методи і прилади контролю якості. - 2000. - №5. - С. 92-99.

2. Городецька О.С. Дослідження статичних метрологічних характеристик вимірювача поверхневого натягу методом лежачої краплі [Текст] / О.С. Городецька // Контроль і управління в складних системах: VIII Міжнар. наук. – техн. конф. (КУСС-2003), Вінниця, 2003р. : тези доповідей – Вінниця, 2003. - С. 63.

3. Великонська Н.М., Надточій А.А. Поверхневі явища та дисперсні системи: Навчальний посібник. – Дніпро: НМетАУ, 2018. – 78 с.

4. Фізична хімія: підручник / Л. С. Воловик, Є. І. Ковалевська, В. В. Манк. та ін. – К.: Фірма "ІНКОС", 2007. — 496 с.  
<https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/889>

5. Яцков М.В., Буденкова Н.М., Мисіна О.І. Фізична та колоїдна хімія. Навч. посібник. – Рівне : НУВГП, 2016. – 164 с. ISBN 978-966-327-333-4

6. Завойко Б.М., Лещій Н.П. Технічна механіка рідин і газів: основні теоретичні положення та задачі. Навчальний посібник.– м. Львів. «Новий Світ».–2004.–119 с.

7. Кісіль І.С. Використання відеотехніки для вимірювання поверхневого натягу методом лежачої краплі / І.С. Кісіль, В.О. Горелов // Методи і прилади контролю якості. - 2000. - №6. - С. 37-39.

8. Forsyth D. A Modern Approach / D. Forsyth, J. Ponce // International Journal of Computer Vision - 2002. - P. 18-24.

9. Parageorgiou C. Trainable system for object detection / C. Parageorgiou, T. Poggio // International Journal of Computer Vision. - 2000. - P. 15-33.
10. Петрук В.Г. Спектрофотометрія світлорозсіювальних середовищ: Теорія і практика оптичного вимірювального контролю / В.Г. Петрук. - м. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2000. - 207 с.
11. Павлов С.В. Неінвазивні методи діагностики серцево-судинної системи [Текст] // Біомедичні оптико-електронні інформаційні системи і апарати: Навчальний посібник/ С.В. Павлов, В.П. Кожем'яко, В.Г. Петрук. - Вінниця: ВДТУ, 2003. - Ч. 1. - 115 с.
12. Афанасьєва О.В. Курський Ю.С., Одаренко Є.М. Оптичні вимірювання: навч. посібник. – Харків: ХНУРЕ, 2021. Ч.1 – 180 с.
13. Кучеренко, О. К. Волоконно-оптичні датчики для автоматизованих інформаційних та інтелектуальних систем [Електронний ресурс] : підручник. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 113 с.
14. Винюрихін А.И., Гречановська В.П. Оптико-електронні поляризаційні пристрої. – К.: Техника, 1984. - 160 с.
15. Копилов В.І., Смирнов І.В. Поверхневі фізико-хімічні процеси. Навчальний посібник.– Київ: Вид. «КПІ», 2012.–230 с.
16. Rio O. I., Neumann A. W. Axisymmetric Drop Shape Analysis: Computational Methods for the Measurement of Interfacial Properties from the shape and Dimensions of Pendant and Semile Drops // Journal of Colloid and Interface Science, № 196,1997. P. 136-147.
17. Ющенко К.А., Борисов Ю.С., Кузнецов В.Д., Корж В.М. Інженерія поверхні: підручник / Київ: наук. Думка, 2007.–558 с.
18. Кузьмін І.В., Кедрус В.А. Основи теорії інформації і кодування /. - К.: Вища школа, 1986. – 238 с.

19. Білинський Й.Й. Автоматизований контроль поверхневого натягу рідин методом лежачої краплі [Текст] : Монографія / Й.Й. Білинський, О.С. Городецька. - Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. - 146 с.
20. Орнатский П.П. Теоретичні основи інформаційно-виміральної техніки / . – К.: Вища школа., 1983. - 455 с.
21. Іващенко Ю.М. Основи прецизійного вимірювання поверхневої енергії розплавів металів за методом лежачої краплі [Текст] / Ю.М. Іващенко, В.Н. Єрмоменко. – К.: Наукова думка, 1972. - іл.
22. Bashfort F. An attempt to test the theories of capillary action / F. Bashfort, J.C. Adams // Cambridge: University Press. - 1883. - 140p.
23. Дурягіна З.А. Фізика та хімія поверхні. Монографія / – Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2009.– 208 с.
24. Кісіль І.С., Кісіль Р.І. Вимірювання поверхневих властивостей на межах розділу фаз: Монографія: У 2 т. Т. 1. Методи максимального тиску у бульбашці, лежачої і висячої крапель та об'єму краплі. – Івано-Франківськ: Видавництво Івано-Франківського університету нафти і газу, 2010. – 298 с.
25. Кісіль І.С., Боднар Р.Т. Вимірювання поверхневих властивостей розчинів для інтенсифікації нафтогазовидобутку і буріння свердловин / Збірник "Проблеми і шляхи в енергозабезпеченні України", м. Івано-Франківськ, ІФДТУНГ, 1994,
26. Алгоритмы и программы восстановления зависимостей [Текст] / [под ред. В.И. Ванника.]. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 816 с.
27. Порєв В.А. Імовірнісний підхід до визначення роздільної здатності телевізійних засобів контролю [Текст]/ В.А. Порєв, Г.В. Порєв, Р.І. Кісіль // Методи та прилади контролю якості.-2002.-№8.-С.40-43.
28. Й. Й. Білинський. Аналіз сучасних багатоелементних фотоприймальних пристроїв та оптикоелектронних методів і засобів на їх основі // . Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2005. № 5.. С. 9–15

29. Кісіль І.С. Метрологія, точність і надійність результатів та засобів вимірювань: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. – Івано-Франківськ: Видавництво «Факел», 2002. – 400 с.

31. Dorsey N. E. A new equation for the determination of surface tension from of sessile drop jr bubble // J. of the Washington Acad. Of Sci. 1928, 18, 19. P. 506-506.

32. Кісіль І. С., Боднар Р. Т., Біліщук В. Б., Барна О. Б., Витвицька Л. А. Вимірювання поверхневих властивостей на межах розділу фаз. Монографія у 2-х т. Т. 2. Методи обертової краплі, розгорнутого меніска, витягування тіл, вимірювання крайового кута змочування.– м. Івано-Франківськ: Вид. ІФНТУНГ.– 2018, 406 с.